

CORTADORA DE CÉSPED AUTOMATIZADA

PRESENTADO POR:

MANUEL ALEJANDRO MUÑOZ CHACON CÓDIGO: 701900

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BOGOTÁ D.C.

2019

CORTADORA DE CÉSPED AUTOMATIZADA

PRESENTADO POR:

MANUEL ALEJANDRO MUÑOZ CHACON CÓDIGO: 701900

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico y de
Telecomunicaciones**

Director

JOSE ROBERTO CUARAN VALENZUELA

Ingeniero Electrónico, MSc.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BOGOTÁ

2019



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, mayo de 2019

DEDICATORIA

A mi madre Carmen

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Manuel

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mi hermana Diana

Por ser el ejemplo de una hermana mayor y de la cual aprendí aciertos y de momentos difíciles;

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de grado fue elaborado bajo la supervisión del ingeniero José Roberto Curaran Valenzuela al cual quiero expresarle mi gratitud por haber apoyado el proceso realizado durante la elaboración de este trabajo de grado y a todo el plantel educativo de la universidad el cual me brindo apoyo y consejo cuando lo fue necesario, además de brindar las bases para convertirme en un profesional no solo en conocimientos sino como persona.

Y a todos los que han estado a mi lado apoyándome a lo largo de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	6
1. INTRODUCCIÓN	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1 ANTECEDENTES.....	18
3. OBJETIVOS	23
3.1 GENERAL.....	23
3.2 ESPECIFICOS.....	23
4. JUSTIFICACION	24
5. MARCO DE REFERENCIA.....	27
5.1 MARCO TEORICO	27
5.2 MARCO CONCEPTUAL	41
6. METODOLOGÍA.....	46
6.1 RECOPIACION DE INFORMACION	46
6.2 DISEÑO	46
6.3 IMPLEMENTACIÓN.....	46
6.4 PRUEBAS.....	47
7. DISEÑO.....	49
7.1 DISEÑO MECÁNICO.....	49
7.2 DISEÑO ELECTRÓNICO	60
8. IMPLEMENTACION	74
8.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MECANISMO.....	74
8.2 IMPLEMENTACION ELECTRONICA	76

8.3 PRUEBAS REALIZADAS	89
9. DESCRIPCION ECONOMICA DEL TRABAJO DE GRADO	97
10. CONCLUSIONES.....	98
11. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	100
12. BIBLIOGRAFÍA	101
13. ANEXOS	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ackerman.....	30
Figura 2 Triciclo	30
Figura 3 Robot diferencial	31
Figura 4 Consideración de parámetros en un robot diferencial.....	32
Figura 5 Diagrama de direcciones de movimiento de robot diferencial.....	33
Figura 6 Secuencia de motores paso a paso.....	38
Figura 7 Motor paso a paso configuración interna	39
Figura 8 Modelo de motor DC con carga	40
Figura 9 Primera cortadora de césped.....	44
Figura 10 Cortadora de césped helicoidal	45
Figura 11 diagrama de flujo de la metodología	47
Figura 12 Resumen de actividades por etapa.....	48
Figura 13 Ruedas con neumático de goma	50
Figura 14 ruedas todo terreno.....	50
Figura 15 Motores 57STH56.....	55
Figura 16 Imagen de estructura básica para el prototipo	57
Figura 17 Imagen del desarrollo esperado de la podadora.....	58
Figura 18 Vista lateral del diseño de la podadora	58
Figura 19 Vista frontal del diseño de la podadora.....	58
Figura 20 Conexión de magnetómetro a la tarjeta Raspberry pi 3.....	65
Figura 21 Conexión de módulo de potencia de los motores	67
Figura 22 Conexión de motor por medio de relé.....	68
Figura 23 Diagrama de bloques general del dispositivo.	70
Figura 24 Diagrama de flujo del proceso general	71
Figura 25 Esquema para giro tracción diferencial.....	73
Figura 26 Vista lateral de la podadora montaje realizado	74
Figura 27 Vista frontal de la podadora montaje realizado	75
Figura 28 Vista lateral de la podadora terminada	75

Figura 29 Vista frontal de la podadora terminada	75
Figura 30 Vista general de la podadora terminada	76
Figura 31 montaje final de la podadora.....	76
Figura 32 sistema de control -Raspberry pi 3	78
Figura 33 Esquema para definir las trayectorias.....	79
Figura 34 Ejemplo trayectoria con pendiente negativa	80
Figura 35 Ejemplos de trayectorias con pendiente positiva	81
Figura 36 Diagrama de flujo de la ejecución de trayectorias	83
Figura 37 Simulación de curvatura a partir de rectas.....	84
Figura 38 Configuración de magnetómetro con puerto I2C de la tarjeta Raspberry pi 3	85
Figura 39 Conexión del magnetómetro en el prototipo	86
Figura 40 Conexión de módulo TB6600 a los motores	86
Figura 41 Conexión de relé a motor de cuchilla.....	88
Figura 42 Simulación de ruta en un espacio controlado	91
Figura 43 Imagen de ventana para la programar trayectoria	91
Figura 44 Dimensiones de la estructura básica del prototipo	94
Figura 45 Imagen del desarrollo esperado de la podadora.....	94
Figura 46 Vista lateral del diseño de la podadora	95
Figura 47 Vista frontal del diseño de la podadora.....	95
Figura 48 Circuito de simulación de motor DC.....	107
Figura 49 simulación con varietales de entrada constante y una aumentando....	108
Figura 50 comportamiento del robot diferencial con una constante de entrada y una que aumenta.	109
Figura 51 Simulación con las dos varietales de entrada constantes.....	110
Figura 52 Comportamiento del robot diferencial con las dos varietales de entrada constantes	110
Figura 53 Establecimiento de conexión remota con el dispositivo	115
Figura 54 Instrucciones para ejecutar la trayectoria	116
Figura 55 Ventana principal para selección de trayectoria	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Selección de ruedas.....	51
Tabla 2 Tabla comparativa de los motores	55
Tabla 3 Resumen de alternativas para motor DC para la cuchilla	56
Tabla 4 Selección de sistema embebido	64
Tabla 5 Selección de módulos de potencia para control de motores.....	67
Tabla 6 Tabla selección de batería	69
Tabla 7 Tabla cambio de ángulo.....	82
Tabla 8 Relación de pasos con la distancia recorrida	89
Tabla 9 Relación de pasos con la distancia recorrida y el ángulo de giro esperado	90
Tabla 10 Tabla de errores.....	93
Tabla 11 Costos Finales de la Implementación	97
Tabla 12 Configuración paso sencillo	111
Tabla 13 Configuración paso completo.....	111
Tabla 14 Configuración medio paso	112
Tabla 15 Configuración de pasos de los motores avance hacia adelante	113
Tabla 16 Configuración de pasos de los motores avance hacia atrás	113
Tabla 17 Configuración de pasos de los motores avance hacia la derecha	114
Tabla 18 configuración de pasos de los motores avance hacia la izquierda	114

LISTA DE CUADROS

CUADRO 1 Alternativas de ruedas para el prototipo	50
CUADRO 2 Posibles motores a utilizar para la tracción del sistema.	54
CUADRO 3 Alternativas magnetómetros	61
CUADRO 4 Alternativas de unidades de control.....	63
CUADRO 5 Alternativas de drivers para los motores	66

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A Simulación de motor	107
ANEXO B Simulación del robot diferencial	108
ANEXO C Configuración de pasos de motor	111
ANEXO D Configuración de secuencias para el desplazamiento del robot	112
ANEXO E Manual del usuario	115

GLOSARIO

AUTOMATIZACIÓN: es el uso de sistemas o elementos computarizados que sirven para controlar máquinas o procesos industriales.

ODOMETRÍA: es el uso de datos de sensores de movimiento, para estimar la posición de vehículos con ruedas.

RASPBERRY-PI: es una placa computadora (SBC) de bajo coste, se podría decir que es un ordenador de tamaño reducido, del orden de una tarjeta de crédito, desarrollado en el Reino Unido por la Fundación Raspberry PI (Universidad de Cambridge) en 2011.

TRAYECTORIA: línea descrita en el plano o en el espacio por un cuerpo en movimiento que determina la ruta tomada desde un punto “A” a un punto “B” descrito anteriormente.

1. INTRODUCCIÓN

La automatización de procesos tiene como fin facilitar ciertas actividades que normalmente son realizadas manualmente por personas con herramientas por lo general rústicas. Estas actividades acarrearán consigo problemas en la calidad de vida de una persona, también suelen ser repetitivas y como consecuencia hace que los procesos sean poco eficientes. Por tal motivo, la automatización se ha vuelto cada vez más común para agilizar y perfeccionar estas actividades con herramientas y/o máquinas controladas con supervisión mínima.

Un gran ejemplo es la poda de césped, su objetivo principal es cortar el césped para mejorar su aspecto y ver una uniformidad en el terreno. Este trabajo de grado ha tenido diferentes formas de realizarse, sin embargo, la más utilizada actualmente se hace por máquinas manejadas por un humano. Ese trabajo de grado puede tener tanto beneficios como algunos problemas que con la automatización se busca contribuir con una alternativa que pueda mejorar todos estos aspectos negativos, como la contaminación por la combustión de motores, riesgos físicos y malos resultados.

El estudio en un sistema de corte es indispensable para observar trayectorias o rutas las cuales no se han realizado. Estos datos brindan la posibilidad de establecer una pauta para generar nuevos enfoques en la planeación y ejecución de trayectorias en la poda de césped. Con este estudio se puede comparar las diferentes tonalidades en el césped de un terreno deportivo que se deben al sentido en el que se realiza el corte de la grama. Por razones como estas, la automatización es una buena opción para la ejecución de estos trabajos a través de una programación y la tarea de corte sería reducida a que el operario establezca la ruta de corte y luego recoja el material sobrante.

Los avances realizados han servido para el desarrollo de esta actividad, sin embargo, existen diversos estudios de la podadora de césped que realiza el corte automáticamente, pero tiene ciertas limitaciones, puesto que son dedicadas únicamente a hogares o son manejadas a control remoto por lo que el usuario tendría que estar realizando la operación de la maquinaria igualmente.

En este trabajo de grado se desarrolla una máquina alimentada por electricidad que puede ejecutar patrones preestablecidos necesarios para podar el césped, utilizando como base para la ejecución un sistema basado en un plano cartesiano que brinda la posibilidad de determinar dos coordenadas "X" y "Y" sobre un terreno plano.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La poda de césped manual es un proceso tedioso y cada tipo de cortadora presenta un problema diferente; una de las incógnitas que se presentan es el cambio de color en el césped en los campos deportivos, esto se debe a al sentido en el que se pasa la máquina generando así el efecto visual de las distintas tonalidades y brinda una pauta general de un sector no explotado; en la actualidad se busca reducir la contaminación por lo que la mayoría de las cortadoras de césped con eje vertical utilizan motores de combustión, lo cual se trata de eliminar o de mitigar al máximo.

A diferencia de las podadoras de tractor, que sólo son conducidas, las otras presentan el inconveniente de que es necesario el esfuerzo físico ya sea para empujarla o para cargarla según el tipo de podadora, lo cual genera desgaste sobre el cuerpo. También hay que tener presente que todas las zonas de corte no se encuentran en las mejores condiciones; existen zonas en las ciudades que por falta de poda se empiezan a generar proliferación de plagas que podrían afectar la salud de un trabajador al momento de ingresar a la zona donde se tiene que podar, por lo cual es necesario un sistema de poda que no afecta la salud del operador y que a su vez se pueda brindar una instrucción para que se realice de manera autónoma sin vigilancia.

En Colombia el modo de cortar el césped se hace de manera manual con un operario detrás de una máquina, lo cual conlleva a que sufra de agotamiento físico en el proceso de corte, dado que la mayoría usa cortadoras con motor de explosión, ya sean cortadoras de cilindro o cortadoras de eje vertical, las cuales poseen gran peso debido a su motor de combustión. Adicionalmente, estos motores emiten gases contaminantes que afectan la salud del operador y de la vecindad.

Es importante saber que el mantenimiento de las zonas en la que se encuentra el césped con una altura inapropiada llega a generar problemas de salud dado que se genera acumulación de mosquitos y estos representan focos de enfermedades. Según la resolución 114 de 2003 de la Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos, advierte el riesgo químico y biológico, a los que tuviesen lugar, de los trabajadores que desempeñen obras en espacios con alta densidad de pasto o césped. Regulando dicha labor y protegiendo al trabajador para que su desempeño de forma segura y no afecte su salud. “La proliferación de pastos sin cortar en separadores, lotes y parques de la ciudad es cada vez más crítica. Césped de hasta 70 centímetros de altura alcanzan a registrarse en algunas zonas, lo que está generando proliferación de roedores, escombros y presencia de ladrones que se ocultan en la maleza”.¹

Algunos de los operarios pueden abstenerse de realizar tareas en este tipo zonas, dado que les preocupa su salud, por lo que un dispositivo le puede ser de gran utilidad al momento de afrontar zonas con dificultades de acceso para el operario por las condiciones del entorno. Con el prototipo desarrollado en este trabajo de grado, se podría enviar la cortadora de césped sin necesidad de arriesgar la salud en ese lugar de poca higiene.

En este orden de ideas, en este trabajo de grado se buscó resolver la pregunta “¿cómo implementar una podadora de césped autónoma con seguimiento de trayectorias preprogramadas que no afecte la integridad del operador?”.

¹ REDACCIÓN BOGOTÁ. Título: Aumentan quejas por falta de poda de pastos en Bogotá: Crisis es por cambios en contratación. Denuncian problemas de roedores y basuras. Distrito responde. [en línea. Bogotá: El Tiempo, 13 de junio de 2013, 01:05 am. [Consultado: 26 de octubre de 2017]. Disponible en Internet: <http://uao.libguides.com/c.php?g=529806&p=4412778>

2.1 ANTECEDENTES

En la actualidad se encuentran cortadoras de césped de todo tipo, la mayoría son de trabajo manual como lo son las de arrastre, o se encuentran de tipo tractor que tienen la capacidad de corte a gran escala, pero tienen un consumo en combustible alto lo cual genera contaminación. Se encuentran en el mercado máquinas eléctricas, pero siguen siendo de trabajo manual, las cuales tienen que ser llevadas por un operario durante todo el proceso, o podadoras de césped automatizadas para los hogares, las cuales no tienen ningún patrón de cortado y son limitadas a cortar en cualquier dirección y cualquier altura.

Algunos de los desafíos más importantes que enfrentan el mercado de cortadoras de césped automatizadas incluyen el coste alto de una cortadora de césped. “El costo elevado de una cortadora de césped automatizada afecta su demanda a nivel mundial. Puesto que la hierba artificial no requiere de corte, fecundación, ni ser regada de la misma manera que la hierba natural. Por lo tanto, la hierba artificial es un modo de ahorrar dinero para los consumidores de césped”.²

A través del tiempo se han realizado diversos métodos para ejecutar tareas que los humanos realizan de manera manual o con maquinaria que se tiene que operar directamente, pero desde el desarrollo de la robótica se encuentran distintos tipos de robots móviles que han evolucionado con cada avance tecnológico para utilizar estos conocimientos y aplicarlos en todo tipo de maquinarias que puedan ejecutar diversas tareas cotidianas que facilitan cada día más las actividades que realiza la

2 *Anónimo Strategic Assessment of Worldwide Robotic Lawn Mower. Coventry: 07 junio 2016; [Consultado: 27 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: <https://search-proquest-com.ezproxyucdc.ucatolica.edu.co/docview/1794078928?accountid=45660>.*

humanidad³.

Por lo anterior, para definir una trayectoria se tiene en cuenta como referencia que estas se definen como la sucesión de posiciones que un robot pueda adquirir desde una posición inicial hasta su punto final. Teniendo en cuenta esto, se puede analizar la publicación realizada por Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable en la que indica como realizan un mapeo de trayectorias con robots exploradores que luego es transferida a otros para ejecutar la trayectoria automáticamente⁴.

En el sector del control y la ejecución de trayectorias se ven diversos campos de acción y diversos métodos como el planteado por Gustavo Scaglia, Olga Quintero Montoya, Vicente Mut y Fernando di Sciascioque, quienes obtienen errores en simulación de tan solo 20mm que es un error bastante pequeño⁵. Se puede definir otra forma de ejecutar trayectorias como la integración trapezoidal que fue un método estudiado por Danilo Navarro y otros en el 2007 quienes presentan un artículo en el cual ayudan a reducir el error presente en la odometría de robots diferenciales corrigiendo errores cinemáticos⁶, que usualmente se presenta en

3 BARRIENTOS SOTELO, Víctor Ricardo. GARCÍA SÁNCHEZ, José Rafael. Dr. SILVA ORTIGOZA, Ramón. Profesor del CIDETEC-IPN. Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte. polibits, 2007, XVII 1, 35. [Consultado: 27 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: https://www.polibits.gelbukh.com/2007_35/Robots%20Moviles_%20Evolucion%20y%20Estado%20del%20Arte.pdf.

4 MARISCAL GARCÍA, Efraín. planeación y seguimiento de trayectorias de robots móviles en una simulación de un ambiente real. [en línea]. En: Ra Ximhai Universidad Autónoma Indígena de México Ra Ximhai, enero-abril, año/Vol.1, Número 1. [Consultado: 18 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.uaim.edu.mx/webraximhai/12.pdf>.

5 SCAGLIA, Gustavo, QUINTERO MONTOYA, Olga, MUT, Vicente y DI SCIASCIO, Fernando. Seguimiento de trayectoria de robots móviles utilizando método de integración trapezoidal [en línea]. En: AAECA 2006. Congreso Argentino de control automático. Agosto, 2006, [Consultado: 18] de abril de 2019]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/2PeDnXS>

6 NAVARRO, Danilo., GINES BENET Gilbert., ríos, Luis Hernando. BUENO L., Maximiliano. Mejoras en la localización odométrica de un robot diferencial mediante la corrección de errores sistemáticos. [En línea] ,29 de marzo del 2018]. disponible en internet: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4035/2291>.

campos exteriores, por lo que es un factor decisivo para el desarrollo de este proyecto. Se encuentran también modelos para ejecución de trayectorias en interiores realizadas en simulación por el colombiano Efraín Grisales Ramírez en el año 2013, quien muestra en su tesis cómo el control de las velocidades de las ruedas de un robot con tracción diferencial puede ejecutar casi cualquier ruta⁷.

También se ve cómo se enfoca las trayectorias de los robots para determinar obstáculos y circular por ambientes desconocidos por medio de diagramas de Voronoi que resultan ser bastante eficientes y tiene poco consumo de hardware como lo estipula Ángel Moya Carrasco en su trabajo de grado⁸. Para determinar una relación frente a los puntos de referencia se tiene que tener en cuenta la posición del robot móvil y un método para ejecutar su trayectoria, esto se puede realizar por medio de mediciones internas como la odometría o estaciones externas.⁹

Actualmente, muchos campos de acción pueden ser automatizados porque se han generado diversos estudios para automatización de procesos como el cortado de césped y se diseñan distintos métodos para permitir al hombre evitar riesgos como lo es realizar el control de una máquina de forma remota como lo que realizaron

7 GRISALES RAMÍREZ, Efraín. control de un robot móvil en entornos domésticos [en línea]. Manizales, Colombia. universidad nacional de Colombia sede Manizales. facultad de ingeniería y arquitectura. departamento de ingeniería eléctrica, electrónica y computación, 2013. [consultado: 28 de marzo de 2018]. disponible en internet: <https://oatd.org/oatd/record?record=oai%5c%3awww.bdigital.unal.edu.co%5c%3a12164>.

8 MOYA CARRASCO, ángel. generación de trayectorias en tiempo real a partir de diagramas de voronoi [en línea]. Sevilla. universidad de Sevilla. ingeniería de las tecnologías industriales. departamento de sistemas y automática, 2016. [consultado: 30 de marzo de 2018]. disponible en internet: https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/44404/tfg_angel_moya_carrasco.pdf?sequence=1&isallowed=y

9 GONZÁLEZ JIMÉNEZ, Javier; OLLERO BATURONE, Aníbal. Estimación de la Posición de un Robot Móvil [en línea]. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla. Facultad. 17 febrero 2015. [Consultado: 17 de abril de 2018]. Disponible en Internet: https://www.researchgate.net/profile/Javier_Gonzalez-Jimenez/publication/267222718_Estimacion_de_la_Posicion_de_un_Robot_Movil/links/54ba1f370cf24e50e93dd5de.pdf.

Ruiz Gamboa y otros, con el diseño de una podadora teleoperada¹⁰. El desarrollo de podadoras automatizadas se encuentra una que genera corte desde el borde del campo hacia el centro de este por medio de sensores de luz que determina las zonas que no han sido podadas este desarrollo fue realizado por Hugh A. Griffin¹¹; Teniendo en cuenta sistemas operados a distancia se ve que es de vital importancia en la mayoría de los casos dar instrucciones a los robots ya que no siempre la ejecución se realizara correctamente por lo que es necesario entablar comunicación por distintos medios por lo general se entabla el uso de internet como lo plantea Alaa Mohamed en su trabajo de grado¹².

Las comunicaciones remotas son de vital importancia para evitar que las personas sufran diversos trastornos por cuestiones ambientales, desgaste corporal, lo cual baja la accidentalidad, por lo que el uso de la tele operación para desarrollar actividades de supervisión inmediata pero con un alto nivel de peligrosidad como lo han realizado en el Instituto Tecnológico de Toluca para transporte de material radiactivo¹³, la autonomía que debe tener un robot para realizar una navegación inteligente conlleva a una dotación sensorial para percibir y modelar el entorno en tiempo real de la posición precisa para optimizar la planificación de sus trayectorias, la idea de fusionar un receptor GPS diferencial y sensores tanto internos como externos basado en la odometría permiten lograr un compromiso de fiabilidad y

10 RUIZ GAMBOA, Jorge Iván y PAILLACHO CUMBICUS, Christian jose. diseño y construcción de un prototipo de cortadora de césped automática [en línea]. Sangolquí. universidad de las fuerzas armadas - espe. ingeniero en mecánica. ingeniería mecánica, 2015. [consultado: 1 de abril de 2018]. disponible en internet: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/11526/t-espe-053003.pdf?sequence=1&isallowed=y>

11 AGILE SYSTEMS, INC. automaticlawn mower [en línea]. HUGH A. GRIFFIN. Appl. No.: 717,870. United States Patent. 4,133,404. Jan. 9, 1979. [Consultado: 5 de mayo de 2019]. Disponible en Internet: <https://patents.google.com/patent/US4133404A/en>.

12 KHAMIS RASHWAN, Alaa Mohamed. INTERACCIÓN REMOTA CON ROBOTS MÓVILES BASADA EN INTERNET [en línea]. TESIS DOCTORAL Ingeniero Industrial. Madrid. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2003. [Consultado: 18 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.100.6237&rep=rep1&type=pdf>.

13 SEGOVIA DE LOS RIOS, Armando. ZAMORA, Cesar. GARDUÑO, Mayra. Robot Móvil Teleoperado Mejorado para el Transporte de Material Radioactivo [en línea]. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/015/39015133.pdf.

precisión de las medidas y posición en cada instante del robot.¹⁴ A partir de una estimación odométrica que es un método de localización y su hardware reconfigurable (FPGAS), los cuales se fusionan con mediciones de posición absoluta para producir así mejores resultados en la localización global del vehículo.¹⁵

¹⁴ A. POZO-RUZ, Maria C. GARCÍA-ALEGRE, Ángela RIBEIRO_SANDOVAL, Franciscol. LOCALIZACIÓN DE VEHÍCULOS: FUSIÓN DE MEDIDAS GPS Y ODOMETRÍA. [en línea] consultado [22 de abril 2019] disponible en internet https://www.researchgate.net/profile/Domingo_Guinea/publication/237469731_LOCALIZACION_DE_VEHICULOS_FUSION_DE_MEDIDAS_GPS_Y_ODOMETRIA/links/004635329b3599f8c5000000/LOCALIZACION-DE-VEHICULOS-FUSION-DE-MEDIDAS-GPS-Y-ODOMETRIA.pdf

¹⁵ VALENCIA V., Jhonny a.; MONTOYA O., Alejandro; RIOS, Luis Hernando. Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica [en línea]. Universidad Tecnológica de Pereira Pereira, Colombia. [Consultado: 17 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84916680034.pdf>

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Desarrollar un prototipo cortador de césped.

3.2 ESPECIFICOS

- Recopilar información sobre la instrumentación requerida para el diseño de la podadora.
- Determinar una estrategia de control para el seguimiento de trayectorias de la podadora
- Implementar una interfaz de usuario para programación de las trayectorias.
- Desarrollar el sistema mecánico y electrónico del prototipo.
- Validar el funcionamiento de la podadora en campo.

4. JUSTIFICACION

El presente trabajo de grado se desarrolló bajo la premisa de realizar una podadora de césped automatizada con el fin de mitigar los problemas causados por las herramientas tradicionales y rudimentarias, las cuales a lo largo de la historia han sido rediseñadas para resultados efectivos y seguros.

Estas herramientas han sido útiles para el cumplimiento de las tareas asignadas, sin embargo, se han visto una serie de desventajas, como la contaminación acústica la cual causa problemas en la percepción del entorno por lo que se pueden ver afectadas personas circundantes de la zona. El olor que emite a causa del humo o gases pueden ser potencialmente perjudiciales para la persona que lo opera y la usabilidad, ya que tienen un gran peso presentando en los operarios problemas musculoesqueléticos.¹⁶ Las personas encargadas de operar la máquina se exponen a los diversos climas, a la proliferación de plagas, césped y tallos con alturas inapropiadas y en dado caso que se tenga que realizar la poda en lugares de poca higiene, estos pueden representar un riesgo al bienestar físico.

Adicionalmente se presentan gran cantidad de accidentes en niños en la que se ven afectados por las cuchillas o en personas mayores por que las podadoras en terrenos abruptos se pueden volcar exponiendo las cuchillas y presentando cortes que requieren tratamientos médicos como son cirugías plásticas, transfusiones de sangre, entre otros, que demuestran la peligrosidad de operar de cerca las podadoras.¹⁷

¹⁶ Prevención integral. POSTER: Estudio de los síntomas musculoesqueléticos en jardineros. [en línea], [revisado 13 octubre 2018]. Disponible en internet: <https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2010/poster-estudio-sintomas-musculoesqueticos-en-jardineros>

¹⁷ T.A. Laing J. B. O'Sullivan N. Nugent M. O'Shaughnessy S.T. O'Sullivan. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery. **Lesiones pediátricas relacionadas con el cortacésped y manejo de cirugía plástica.** Volumen 64, mayo 2011, páginas 638-642;(consultado 1 mayo del 2019). [en línea]; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1748681510004754>

El análisis de todas estas posibilidades planteadas durante el proceso creativo ayuda a desarrollar una máquina capaz de brindar una posible solución a la necesidad que se desea satisfacer bajo los criterios evaluados. Aunque el operador es imprescindible en el proceso, con la elaboración de la podadora de césped automatizada solo se deben dar ciertas instrucciones al dispositivo y el operador solo tendría que encargarse netamente de la tarea de recolección del césped, sin someterse a tantos riesgos.

Las podadoras de césped han generado bastantes casos de personas heridas por la falta de protección y capacitación, lo cual genera un uso inadecuado en su utilización. Por ejemplo, “En Estados Unidos, datos oficiales indican que anualmente cerca de 13 mil niños reciben atención por lesiones con cortadoras de césped en los departamentos de emergencias, pero no son los únicos. Tan solo en 2015, más de 68 mil adultos acabaron en salas de emergencias por el uso de estas máquinas”.¹⁸ Por lo que la implementación de este tipo de mecanismo ayudaría al operario a estar más atento en la supervisión del área y sea fácil de programar para que lo utilicen personas en un rango de edad entre 16 y 60 años, de tal manera que no sucedan accidentes por la manipulación de estos elementos.

No obstante, mantener el césped arreglado es un factor indispensable en algunos espacios y trabajos específicos. Por ejemplo, este trabajo puede fomentar el crecimiento de este tipo de ejecución para realizar el corte que se tienen en los campos deportivos, realizar diferentes tipos de decoración en ciertas zonas que lo puedan requerir y principalmente en las fincas.

La solución propuesta requiere de la aplicación de conceptos de la Ingeniería electrónica y telecomunicaciones, como lo son la automatización, el control

¹⁸ medline plus. cortar el pasto puede ser una actividad peligrosa para niños; conoce cómo reducir el riesgo. [en línea], [revisado 13 octubre 2018]. disponible en internet: <https://www.clikisalud.net/cortar-pasto-puede-una-actividad-peligrosa-ninos-conoce-reducir-riesgo/>

automático y las comunicaciones inalámbricas. Adicionalmente requiere de algunos conceptos de ingeniería mecánica, para lo cual se hace necesaria una recopilación bibliográfica de mecanismos que pueden ser adaptados a la solución propuesta.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO TEORICO

5.1.1 Sistemas embebidos. Un sistema embebido es un sistema programable dedicado a realizar una única tarea preprogramada, como tal se utiliza en similitud a los equipos de cómputo, pero estos sistemas no tienen la capacidad multitareas de gran capacidad.

Estos sistemas presentan un bajo costo conteniendo un nivel de procesamiento bajo que se puede programar sobre su propia memoria de almacenamiento en un lenguaje de programación establecido por el fabricante.

Es la relación de un sistema de computación diseñado para realizar varias funciones dedicadas frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real. En comparación de lo que ocurre con los ordenadores de propósito general (como por ejemplo una computadora personal o PC) que están diseñados para cubrir un amplio rango de necesidades, los sistemas embebidos tienen como objetivo cubrir necesidades específicas.

En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base y muchas veces los dispositivos resultantes no tienen el aspecto de lo que se suele asociar a una computadora. Los sistemas embebidos se pueden programar directamente en el lenguaje ensamblador del microcontrolador o microprocesador incorporado sobre el mismo, o también, utilizando los compiladores específicos, pueden utilizarse lenguajes como C o C++; en algunos

casos, cuando el tiempo de respuesta de la aplicación no es un factor crítico, también pueden usarse lenguajes como JAVA.¹⁹

5.1.2 Lenguajes de programación. Los lenguajes de programación son una forma de indicarle a una máquina lo que se requiera que haga o el procedimiento a realizar se tiene en primera instancia el lenguaje máquina que es la primera generación de lenguajes que consta de mensajes con unos y ceros que es poco entendible para el humano por lo que cada máquina utiliza su propia secuencia de unos y ceros. La segunda generación añade palabras que cada una está asociada a una de las instrucciones es conocido como lenguaje ensamblador, pero no sirve para programación dado que los equipos solo entienden mensajes en unos y ceros.

La tercera generación presenta lenguajes de alto nivel que son comprensibles por los humanos, pero es necesario traducirlo a lenguaje máquina por lo que es necesario el uso de compiladores para realizar la programación. La cuarta generación son lenguajes utilizados para procedimientos muy específicos al igual que la quinta generación que es utilizada para colocar restricciones que resuelve un problema teniendo en cuenta esas restricciones, es principalmente usado en la programación de inteligencia artificial.²⁰

¹⁹ MASTER DEGREE: Industrial Systems Engineering. Controladores industriales de diseño de alto nivel [en línea]. Sistemas Embebidos. INGENIERÍA DE LOS SISTEMAS EMBEBIDOS (HARDWARE -HW) [Consultado; 15 de 05de 2019]. Disponible en Internet: http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE5_3_1.pdf

²⁰ CORTÁZAR, Francisco, MARTÍNEZ Raquel, FRESNO Víctor. *lenguajes de programación y procesadores. segunda edición. Madrid: centro de estudios ramón areces S.A. 2016.*

5.1.3 Robots móviles. Los robots móviles son todos aquellos dispositivos que se utilizan para limitar la intervención humana en el desarrollo de actividades o procesos anteriormente ejecutados por humanos; los inconvenientes que más se presentan en este tipo de dispositivos es la toma de decisiones con respecto a su entorno por lo que se debe aplicar un conjunto de sensores que ayuden a planificar rutas o esquivar algún tipo de obstáculo según la finalidad del dispositivo.

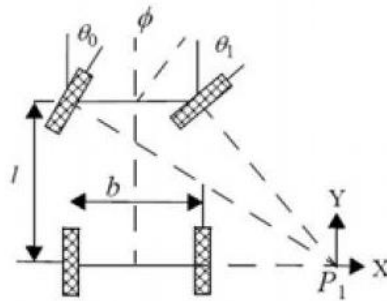
Los robots móviles se pueden dividir en robots autónomos, tele operados y de movimientos repetitivos, según la finalidad de la operación.²¹

5.1.3.1 Robot con ruedas. Son la solución óptima para llegar a lugares distantes con terrenos bastante simples con suelo firme y libre de obstáculos presentan desventaja por los deslizamientos del dispositivo o la vibración lo cual puede alterar el camino que este siga.

- A. Ackerman: En un sistema de locomoción que hace girar las dos ruedas delanteras de vehículos de cuatro ruedas como lo hacen los vehículos convencionales como los automóviles que se usan normalmente. En la figura 1 se ve el diseño de un ackerman mostrando su tipo de locomoción.

²¹ OLLERO BATURONE, Aníbal. Robots móviles. En: robótica manipuladores y robots móviles. Primera reimpresión alfaomega Grupo editor, México julio 2008. 28.

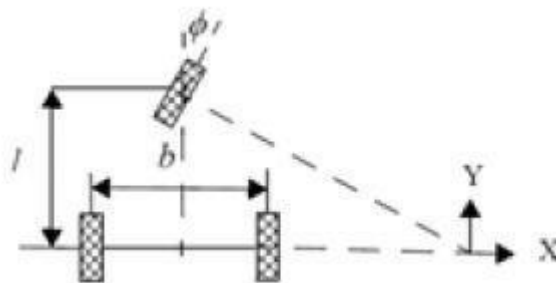
Figura 1 Ackerman



Fuente: OLLERO BATURONE, Aníbal. Robots móviles. En: robótica manipuladores y robots móviles. Primera reimpresión alfaomega Grupo editor, México julio 2008. 28

- B. Triciclos: Usa la rueda delantera para tracción como para la dirección lo cual deja las dos ruedas traseras actuando de manera independiente al sistema brinda más maniobrabilidad que el sistema ackerman, pero tiende a ser más inestable. La figura 2 muestra la locomoción y tracción de un sistema de triciclo.

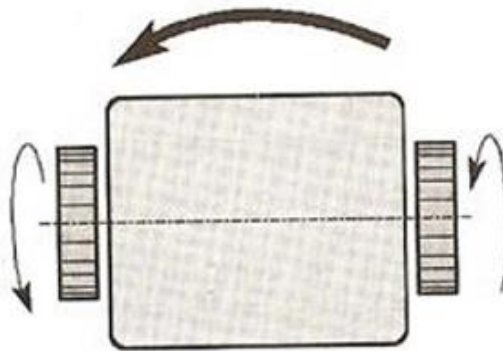
Figura 2 Triciclo



Fuente: OLLERO BATURONE, Aníbal. Robots móviles. En: robótica manipuladores y robots móviles. Primera reimpresión alfaomega Grupo editor, México Julio 2008. 28.

- C. Diferenciales: este sistema utiliza dos ruedas como tracción que giran a diferente velocidad o sentido para generar los giros dependiendo el tipo de giro que se requiera este sistema viene apoyado por una o más ruedas según el diseño. Como se muestra en la figura 3 se ven giros independientes de las ruedas para el giro del robot.

Figura 3 Robot diferencial

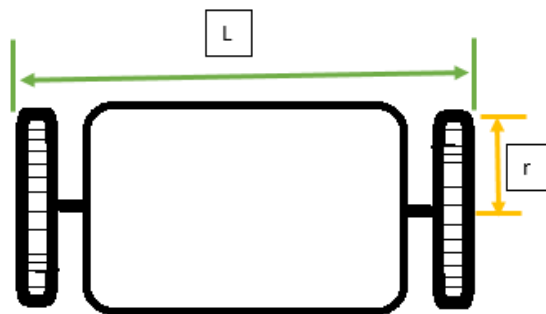


Fuente: <http://www.naylampmechatronics.com>, giro en configuración diferencial [Consultado: 26 de septiembre de 2018]. Disponible en Internet: https://naylampmechatronics.com/blog/53_robot-movil-controlado-por-bluetooth.html

- D. skid steer: utiliza tracción en todas las ruedas de manera simultánea pero las ruedas del lado derecho e izquierdo se mueven a distintas velocidades para generar los giros.

5.1.4 Método de determinación de posición de un robot diferencial. Para el análisis de un robot móvil de tracción diferencial es necesario tener en cuenta los parámetros generales del equipo como lo es la longitud “L” que es la distancia que existe entre las ruedas del vehículo y el radio que tienen las ruedas que se denomina “r”. En la figura 4 se ven las medidas utilizadas a nivel general de los robots diferenciales para realizar los respectivos cálculos.

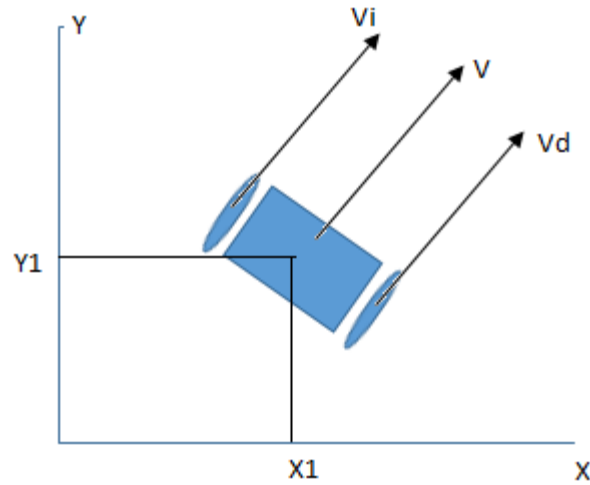
Figura 4 Consideración de parámetros en un robot diferencial



Fuente: Autor.

Para realizar el modelo se tiene que tener en cuenta el movimiento del vehículo en dos dimensiones (x, y) analizando la dirección de movimiento como velocidad lineal V y la velocidad tangencial en cada una de las ruedas “ V_i ” y “ V_d ”. La figura 5 representa las velocidades que presentan el robot diferencial, las velocidades de movimiento de las ruedas y la velocidad total del desplazamiento del robot.

Figura 5 Diagrama de direcciones de movimiento de robot diferencial



Fuente: Autor.

Se puede obtener el modelo matemático para determinar la posición de un móvil de tracción diferencial a partir de las velocidades “Vi” y “Vd”, las cuales se obtienen con las ecuaciones 1 y 2.

$$V_i = W_i \cdot r \quad (1)$$

$$V_d = W_d \cdot r \quad (2)$$

En donde “Wi” y “Wd” son las velocidades angulares de cada rueda. Las velocidades lineales y angulares del robot se obtienen con las siguientes ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

$$v = \frac{V_d + V_i}{2} = \frac{(W_d + W_i) \cdot r}{2} \quad (3)$$

$$w = \frac{V_d - V_i}{L} = \frac{(W_d - W_i) \cdot r}{L} \quad (4)$$

Sabiendo que el robot se mueve en una superficie plana, sin deslizamiento y que los ejes de las ruedas son perpendiculares a la superficie plana, se puede demostrar que si $p = [x, y, \theta]$ es el vector de coordenadas del punto guía del robot y la

orientación de este y si $q' = [v, w]$ es el vector de la velocidad lineal y angular del móvil, respectivamente, por lo que esta se escribe la ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & 0 \\ \cos\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sustituyendo en la ecuación 5 se obtiene la ecuación 6:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \cdot \sin \theta / 2 & -r \cdot \sin \theta / 2 \\ r \cos \theta / 2 & r \cos \theta / 2 \\ -r / L & r / L \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} w_i \\ w_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

5.1.5 Sistemas de posicionamiento de robots móviles

5.1.5.1 Sistema GPS (Global Positioning System). El GPS originalmente Navstar GPS, es un sistema que estima la ubicación y posición de cualquier objeto con una precisión de centímetros, aunque generalmente la ubicación que se brinda depende de la totalidad de satélites que determinen la posición, a nivel general un fallo de algunos metros esta posición se determina con mínimo tres satélites ubicados en la órbita LEO la más baja en esta orbita se ubican alrededor de 24 satélites los cuales determinan la posición en todo el planeta.²²

5.1.5.2 **RTK (*Real Time Kinematic*)**. Navegación cinética satelital en tiempo real, este sistema utiliza la navegación satelital para dar la orientación requerida de los robots, además de esto utiliza estaciones base para generar correcciones en el sistema la cual brinda retroalimentación indicando el tiempo promedio del retraso del pulso de la estación al robot lo que permite indicar la distancia que hay hasta la estación que se utiliza como un punto de referencia constante.

5.1.5.3 **Odometría**. La odometría es un sistema por el cual se pueda estimar la posición de los vehículos con ruedas a partir del control del giro de las ruedas según la distancia de estas y la posición del giro por lo general se utilizan sensores infrarrojos para contar sobre un aro con ranuras llamados “Encoder” las veces que se interrumpe la luz al momento que este gira con las ruedas de un robot este sistema presenta grandes error al momento de implementarse en distancias largas dado que se presenta una estimación con respecto a la posición inicial y no hay un sistema que retroalimente esta función para corregir estos errores.

Es bastante funcional y practico dado que se puede establecer con pocos cálculos y el error en distas cortas es muy poco. Los errores más comunes que presenta este sistema son al moverse por terrenos muy irregulares, o si algún ente externo afecta al robot cambiándole su posición.

5.1.6 **Sensores**. Los sensores son herramientas utilizadas para realizar mediciones y comparaciones del medio para dar estimaciones en un ámbito de medición eléctrica, como tal un sensor da la capacidad de medir variables que se puede establecer a partir de ciertos parámetros según la necesidad (distancia, temperatura, humedad, etc.) variables que se encuentran en el ambiente que en algunos casos son imperceptibles para los humanos, pero el uso de estas herramientas no lleva a ver más allá del uso convencionales de las cosas y variar las aplicaciones que comúnmente se desarrollan.

Cada sensor acoplado a un sistema electrónico brinda la exactitud requerida para realizar procedimientos precisos en cualquier tipo de sistema o cualquier tipo de elemento que brinde una medición; por ejemplo, una regla da una ventana de medición de centímetros que se dividen en milímetros, pero por medio de los sensores se obtienen mediciones aún más pequeñas y exactas.

5.1.6.1 **Compas magnéticos.** Con el uso de brújulas como referencia se entabla la relación de posición del robot dado que se tiene un punto de referencia que no cambia que es el polo magnético de la tierra (polo norte), hay que tener en cuenta los materiales utilizados para el diseño ya que este tipo de dispositivos es sensible a cualquier campo magnético cercano que puede variar la dirección en la que señala el compás o brújula.

5.1.6.2 **Sensores de distancia.** Los sensores que miden distancia se caracterizan por la emisión de cualquier tipo de señal que rebote en un objetivo y regrese al mismo punto determinando así con respecto a la velocidad de la emisión de esta señal y el tiempo en que se recupera la distancia a la que se encuentra un elemento.

Se encuentran sensores que pueden medir con luz o con ondas de radio siempre y cuando se tenga la velocidad constante con la que se emite la señal luminosa o la velocidad de propagación de las ondas de radio se estima la distancia a la que se encuentra un objeto.

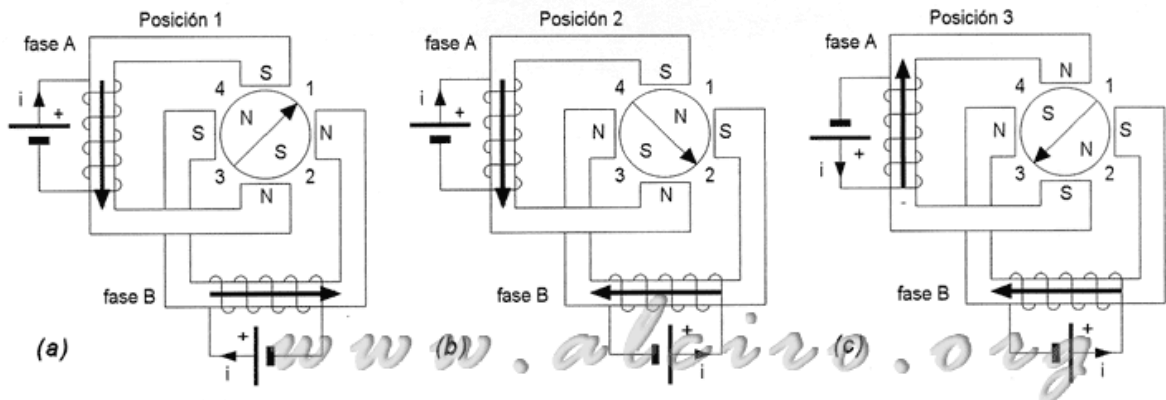
5.1.7 Motores. Los motores hacen referencia a elementos que puedan convertir cualquier tipo de energía en movimiento en estos casos se ven más comúnmente lo que son los motores de los automóviles que utilizan la energía generada por la combustión para así convertir esa energía el movimiento rotatorio de un eje y así generar el movimiento completo del vehículo.

5.1.7.1 Motores eléctricos. Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en movimiento estos motores constan de dos elementos un estator y un rotor. El estator es la parte fija en donde con el cual permitirá el giro del rotor que es la parte central de los motores eléctricos la cual genera el movimiento rotatorio.

Los motores eléctricos se basan en la inducción de campos magnéticos para realizar el movimiento por medio de la inducción de bobinas.

5.1.7.2 Motores paso a paso. Son dispositivos que utilizan pulsos para generar la rotación del eje dependiendo el número de pulsos y la frecuencia en que son enviados se puede determinar la velocidad y la secuencia de giro que tendrán estos motores. La figura 6 muestra el esquema general de pasos del motor y su respectiva secuencia de funcionamiento.

Figura 6 Secuencia de motores paso a paso

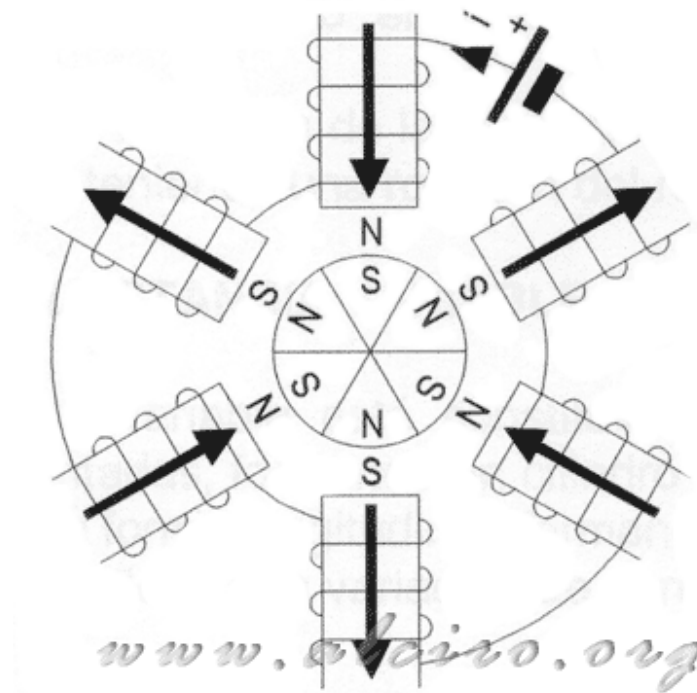


- a) Posición inicial.
- b) Posición después del primer paso.
- c) Posición después del segundo paso.

Fuente: ASIER VIDAL, Bartolomé, Secuencia de motores paso a paso, Diseño e implementación de un sistema de control numérico [Consultado: 28 de septiembre de 2018]. Disponible en Internet: <https://www.biblionline.pearson.com/Pages/BookRead.aspx>

Para aumentar el número de pasos es necesario aumentar el número de polos dentro del núcleo del motor lo que aumentaría el número de bobinas internas que posee el motor. La figura 7 muestra el embobinado interno de un motor paso a paso y su respectiva configuración.

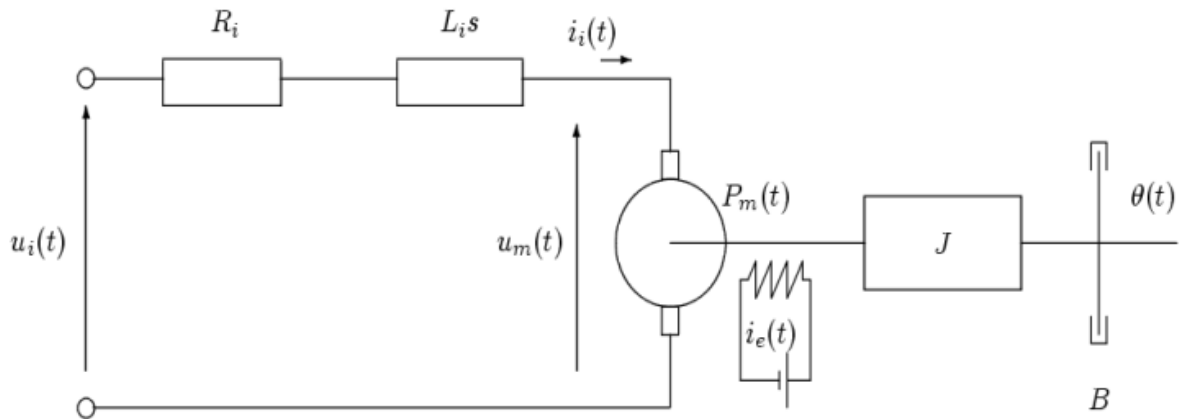
Figura 7 Motor paso a paso configuración interna



Fuente: ASIER VIDAL, Bartolomé, configuración interna de motor paso a paso, Diseño e implementación de un sistema de control numérico [Consultado: 26 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <https://www.biblionline.pearson.com/Pages/BookRead.aspx>

5.1.8 Modelo para un motor DC con carga. Los motores de corriente continua utilizan un embobinado conocido como inductor el cual genera un campo magnético que hace girar el rotor lo cual indica que no hay una conexión eléctrica directa entre el estator y el rotor por lo que se puede definir en dos elementos separados.

Figura 8 Modelo de motor DC con carga



Fuente: isa.uniovi.es, modelo de un motor DC con carga [Consultado: 26 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: http://isa.uniovi.es/ISAwiki/index.php/Modelado_de_un_motor_CC

Teniendo en cuenta esto se denota que el motor solo se comporta con una resistencia y una inductancia (bobina) teniendo una tensión de alimentación se tiene una parte eléctrica y otra mecánica.

Para que el motor cumpla su función, normalmente se le coloca una carga mecánica en el eje del rotor y de esto dependerán las características mecánicas las cuales son: $\theta(t)$ la velocidad angular de giro a la cual trabaja el rotor, J el momento de inercia equivalente del eje rotor con la carga que se desea colocar, B el coeficiente de rozamiento viscoso. Sus características eléctricas la cuales son : $u_i(t)$ es el valor del voltaje asociado, R_i resistencia del motor, $L_i s$ la inductancia de la bobina del motor $i_i(t)$ la corriente que circula a través del circuito la cual da como resultado la potencia $P_m(t)$ expresadas en la figura 8.²³

²³ Alvarez Alvarado Manuel Sebastian. Modelo matemático de un motor de corriente continuo separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura [en línea]. Recibido el 11 de diciembre de 2011; aceptado el 10 de marzo de 2012. [Consultado: 30 de mayo de 2018]. Disponible en Internet: http://www.lajpe.org/mar12/25_LAJPE_611_Manuel_Alvarez_preprint_corr_f.pdf

5.1.9 Comunicación inalámbrica. También conocida como comunicación a distancia permite la comunicación entre un dispositivo a otro sin la necesidad de estar conectados por cables, sino que utiliza ondas electromagnéticas para transmisión de datos y recepción, existen gran cantidad de tecnologías que permite convertir la información a transmitir en ondas electromagnéticas, que representa herramientas muy buenas para la comunicación a distancia.

5.1.9.1 Comunicación Wi-Fi. La comunicación wi-fi (Wireless Fidelity) fidelidad inalámbrica se rige bajo el protocolo IEEE 802.11 que brinda la información de las bandas a utilizar que varían según el país estas bandas son denominadas bandas libres o bandas ISM y se encuentran en los rangos 2.5 GHz y 5GHz, también se encuentra la forma en que se realizan la transmisión de datos utilizando métodos de modulación para generar redes de área local (redes LAN) que tiene una amplia cobertura.

- A. Protocolo RDP: es un protocolo desarrollado por Microsoft que permite a un terminal tomar de manera remota un servidor ejecutando de manera simultánea la imagen y los movimientos que realice el controlador del terminal

5.2 MARCO CONCEPTUAL

5.2.1 Césped, grama o pasto. Conjunto de hierbas sin troncos verdes que son plantadas de manera decorativa en hogares y zonas urbanas de las ciudades parques o jardines de hogares.

Hay diverso tipo de césped que se utiliza según el uso y la resistencia que presenta a las condiciones ambientales o el lugar de instalación. Pueden variar en forma y grosor, pero siempre tiende a ser fino y abundante.²⁴

5.2.1.1 Pasto colosuana. Es un tipo de césped con raíces que llegan a grandes profundidades por lo que son muy resistentes a la sequía tiene un nivel de proteína cruda del 12 % y digestibilidad de 60 a 70 %. Adicionalmente a esto presentan la desventaja de que en su recolección solo se puede obtener 2 toneladas por hectárea.

5.2.1.2 Pasto Toledo. Este es un pasto que se puede cultivar en zonas con un nivel de precipitaciones bajas tiene un nivel de proteína cruda de 13% y su nivel de digestibilidad de 67% y se pueden obtener 30 toneladas de material seco por hectárea.

5.2.1.3 Pasto Pará. Este pasto crece en zonas con bastante humedad es una opción que se presenta para largos periodos con intensos fríos para brindar forraje con un contenido de proteína cruda de 10 %.

5.2.1.4 Pasto Humidícula. Es un tipo de pasto que crece en terrenos que tienen un nivel de potencial de hidrogeno (pH) bastante bajo por lo que se considera que crece en suelos ácidos y solos tiene el 5% de proteína cruda.

²⁴ PALLAREZ, Mayra. La lista de pastos tolerantes a los diferentes tipos de suelos [en línea]. <http://www.contextoganadero.com/>. (16 de mayo de 2016), [Consultado: 11 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.contextoganadero.com/reportaje/la-lista-de-pastos-tolerantes-los-diferentes-tipos-de-suelos>

5.2.2 Podadora de césped. Es una máquina manual o motorizada que se utiliza para el corte del césped, hierva, grama o pasto que permite mantener un nivel de altura determinado en los campos deportivos, jardines y zonas urbanas que utilizan para la decoración de las ciudades.

5.2.2.1 Historia de la podadora. Desde la antigüedad se usa el elemento conocido como guadaña un elemento fundamental utilizado para cortar pasto, heno y cosechar los cultivos de los campos, lo cual facilitaba a los campesinos la recolección de cereales.

Con el fin de mantener los campos deportivos y los grandes Edwin Budding, en el año 1827, en Thrupp, a las afueras de Stroud, Gloucestershire, creo la primera podadora de césped como una alternativa para la guadaña que fue patentada hasta el año 1830, des pues de diez años fue implementado el sistema de arrastre por animales para facilitar el trabajo dado que en esa época los motores de combustión eran demasiado grandes la podadoras existentes solo poseían un eje helicoidal para realizar el procedimiento no fue hasta los finales del año 1920 y principios de 1930 que se presentó la primera podadora a gasolina.²⁵La figura 9 muestra el diseño de la primera podadora de césped utilizada.

²⁵ ANONIMO. *History of the Lawn Mower* [en línea]. <http://www.american-lawns.com>. [Consultado: 16 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: http://www.american-lawns.com/history/history_mower.html

Figura 9 Primera cortadora de césped



Fuente: www.american-lawns.com, Primera cortadora de césped, [Consultado: 26 de septiembre de 2018]. Disponible en Internet: <https://www.biblionline.pearson.com/Pages/BookRead.aspx>

5.2.2.2 Podadora de césped de eje vertical. Las podadoras de eje vertical presentan la rotación de una hélice con cuchillas que corta el pasto por el impacto que tiene una de las cuchillas que gira a gran velocidad. Existen varios tipos de podadora con eje vertical como lo son las de tipo guadaña. Las de tipo tractor o autopropulsadas.

5.2.2.3 Podadora de césped helicoidal. Es una podadora que funciona por medio del empuje utiliza una cuchilla que gira y otra que se mantiene en un tambor fijo que al momento de pasar por la grama estas dos hojas actúan como el corte de una tijera lo cual genera un corte más limpio. La figura 10 muestra el diseño general de las podadoras helicoidales.

Figura 10 Cortadora de césped helicoidal



Fuente: <http://www.interempresas.net>, Cortadora de césped helicoidal, [Consultado: 26 de septiembre de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.interempresas.net/Jardineria/FeriaVirtual/Producto-Cortacespedes-helicoidales-Gardena-400-C-Comfort-133769.html>

5.2.3 Regulación de corte para Bogotá. La RESOLUCIÓN 114 DE 2003 establece la normativa para el corte de césped en áreas comunes de Bogotá Colombia distrito capital; en la sección 2.5 establece:” Consiste en la acción misma de corte, de tal manera que la altura mínima del pasto no supere los 2.0 centímetros. Como resultado de la labor de corte del césped en zonas verdes no deben quedar expuestos los estolones y rizomas del kikuyo a fin de evitar consecuencias erosivas. En ningún caso, la altura del césped podrá superar 8 cm.”²⁶

²⁶ Colombia. Alcaldía de Bogotá. resolución 114 de 2003 (,2003). 2.5 Corte de césped. [en línea]. Resolución 114 de 2003 Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos - U.E.S.P. Bogotá, 2003. [Consultado: 27 de octubre de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=23393>

6. METODOLOGÍA

6.1 RECOPIACION DE INFORMACION

Se realiza la búsqueda de información necesaria para el desarrollo de este trabajo de grado , como los sistemas de posicionamiento, los tipos de motores, estrategias de control, sensores para la retroalimentación del sistema, tipo de corte, cuchilla a utilizar, fuente de alimentación, entre otros.

6.2 DISEÑO

Se seleccionan los elementos a utilizar teniendo en cuenta las necesidades del trabajo de grado y las características técnicas y económicas de los mismos. Se hacen cálculos de consumo eléctrico, del torque requerido para el movimiento del dispositivo, etc.; también se realizan los planos electrónicos y mecánicos del prototipo. Adicionalmente, se establece el diagrama de flujo del funcionamiento general del prototipo.

6.3 IMPLEMENTACIÓN

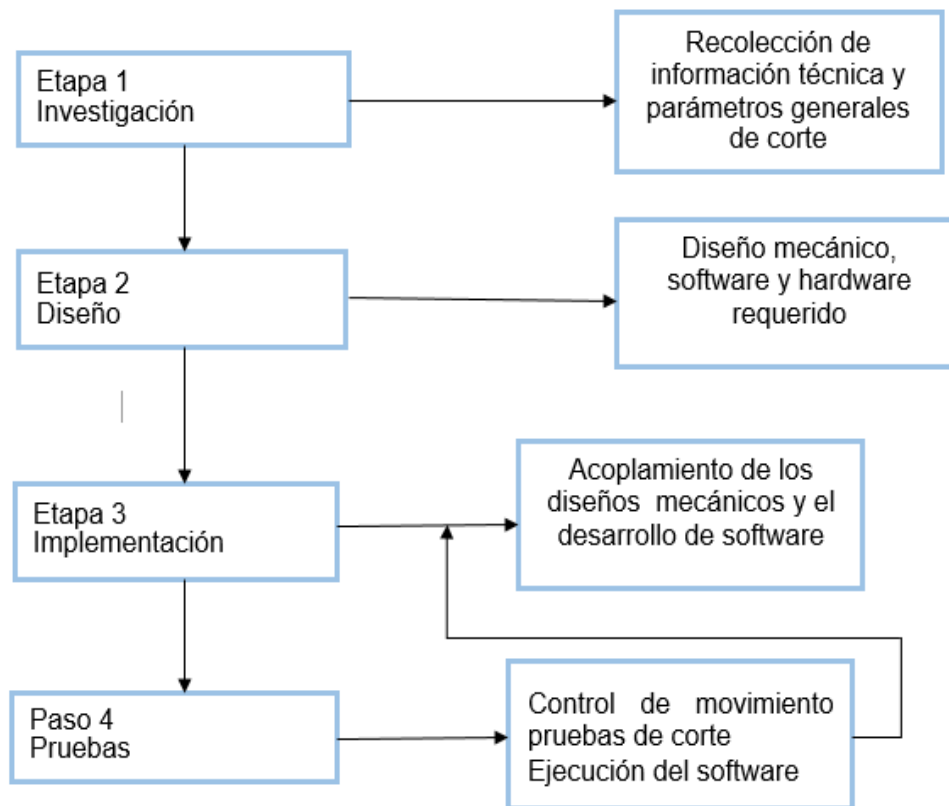
En esta fase se ejecuta el diseño, se interconectan los diferentes dispositivos electrónicos, se realiza la estructura mecánica, se programa la unidad de control con la interfaz del usuario y el respectivo método para realizar la ejecución del proceso.

6.4 PRUEBAS

Se realizó procedimientos de comparación para determinar la eficacia del prototipo, dado que se debe configurar para mitigar los errores que este pueda tener realizando estos procedimientos controlados para realizar las mediciones precisas.

En la figura 11 se presenta el diagrama de flujo el cual determina el procedimiento a desarrollar mostrando las 4 etapas generales que se llevaran a cabo en el desarrollo del trabajo de grado. En la figura 12 se resumen las actividades realizadas en cada una de las etapas y más adelante se detallará cada procedimiento según corresponda.

Figura 11 diagrama de flujo de la metodología



Fuente: Autor.

Figura 12 Resumen de actividades por etapa

etapa 1		etapa 2		etapa 3		etapa 4	
investigación	actividades	diseño	actividades	implementación	actividades	pruebas	actividades
tecnologías	búsqueda en bases de datos y documentos con información relevante	estructura	cuchilla	programación de software	control de motores	ejecución de trayectorias	comparación de trayectoria con uso de sensores
	estudio de condiciones de entorno		dimensiones		sistema de sensores		
	métodos para establecer posición	hardware	sistema embebido		ejecución de trayectorias		
	métodos de corte		sensores	acoplamiento de cuchilla	corte de césped	realizar corte del césped con las cuchillas	
	métodos para retroalimentar la posición		tracción				
regulación	regulación para corte de el pasto en Bogotá		motores	estructura	posición de las ruedas	comparación del sistema en entornos controlados	toma de medidas
		software	diagramas de flujo				

Fuente: Autor.

7. DISEÑO

El diseño del prototipo comprende: diseño mecánico y diseño electrónico. El diseño mecánico comprende el diseño de la estructura mecánica del prototipo y la selección del sistema de tracción (motores) y de corte. Por otra parte, el diseño electrónico se divide en diseño hardware y software. Como hardware se tiene el sistema de potencia y el sistema de control. El diseño software involucra la programación del sistema de control y el desarrollo de la interfaz de usuario para la definición de trayectorias.



7.1 DISEÑO MECÁNICO

7.1.1 Ruedas de tracción. De los modos en el que se puede realizar los movimientos del este prototipo se elige la tracción diferencial para poder realizar giros precisos y controlados con dos motores a pasos colocados en la parte delantera del prototipo para poder contarlos y establecer de un modo odométrico la posición inicial y el movimiento generado en el transcurso de la trayectoria.

La tracción diferencial con respecto a otras formas de tracción presenta un mejor sistema de control para las direcciones y es más preciso y estable por su posibilidad de controlar los giros del motor.

Se evalúan la mejor opción con respecto a las ruedas, la mejor tracción y el mejor agarre para evitar el movimiento no deseado del prototipo que pueda afectar las trayectorias que se vayan a ejecutar. Se opta por una versión distinta a las de las podadoras comunes dado que tienen ruedas muy delgadas y este es un factor no deseado puesto que brindan poca estabilidad.

CUADRO 1 Alternativas de ruedas para el prototipo

Ruedas de goma	<p>Estas ruedas poseen un núcleo rígido pero la goma tiende a ser bastante liza y es comúnmente utilizada para proyectos de robots móviles en interiores. La Figura 13 muestra una imagen de este tipo de ruedas.</p> <p style="text-align: center;">Figura 13 Ruedas con neumático de goma</p>  <p>Fuente: tdrobotica.co. Par De Ruedas Con Neumático De Goma [imagen]. [Consultado: 26 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: http://tdrobotica.co/par-de-ruedas-con-neumatico-de-goma-65mm-/457.html?search_query=ruedas&results=84</p>
Ruedas todo terreno	<p>Las ruedas todo terreno presentan gran profundidad en las ranuras, lo que es de utilidad para terrenos irregulares. Adicionalmente trae algunos picos en su neumático para dar mejor agarre (Figura 14).</p> <p style="text-align: center;">Figura 14 ruedas todo terreno</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Autor.</p>
Ruedas pololu	<p>Son ruedas diseñadas un núcleo de plástico con neumático de goma. Las hendiduras del neumático tienen una gran profundidad.</p>

Para las ruedas se busca que tengan la capacidad de no deslizarse sobre el pasto para que el dispositivo no pierda estabilidad y las trayectorias se desfasen. Teniendo

en cuenta el cuadro 1 se obtiene una imagen general de lo que se busca para el desarrollo del trabajo de grado. En el mercado se encuentra gran variedad de ruedas que poseen diferentes características según la necesidad.

La tabla 1 muestra las características generales que se tendrán en cuenta para la selección de las ruedas en el desarrollo del trabajo de grado teniendo en cuenta el tamaño y el terreno de aplicación.

Tabla 1 Selección de ruedas

tipo de rueda	Tamaño	terreno	
	diámetro (cm)	plano	irregular
ruedas de goma	10		
todo terreno	12		
pololu	8.2		

Mal desempeño	
Buen desempeño	

Fuente: Autor.

Las ruedas para la superficie del pasto necesitan tracción sobre un terreno irregular por lo que se determina que las ruedas todo terreno son la mejor opción para el desarrollo de este trabajo de grado.

7.1.2 Cálculo de potencia y torque requerido para la tracción. Para determinar los motores a utilizar se debe tener en cuenta la fuerza (torque o par motor) que requiere cada uno de ellos para mover el dispositivo. Este se obtiene a partir de la potencia máxima que requiere el dispositivo. En la ecuación número 7 se muestran los parámetros requeridos para este cálculo.

$$\text{Potencia máxima} = \mu_e \times \text{Masa (Kg)} \times \text{Gravedad} \times \text{Velocidad (m/s)}. \quad (7)$$

Donde “ μ_e ” es el coeficiente de rozamiento entre el césped y la goma.

Para el caso de este trabajo de grado se determina la masa según podadoras manuales que son las más ligeras, puesto que las podadoras de motor tienen un peso excesivo que ronda entre los 20 y 30 kilogramos, las podadoras de arrastre se encuentran comercialmente con pesos entre los 5 y 7 kilogramos por lo que se opta por realizar el trabajo de grado bajo la premisa que de que se supera la masa de las podadoras manuales sin llegar al punto del peso de una podadora de motor por lo que se selecciona una masa total de 10 Kg; el radio de las ruedas seleccionadas es de 6 cm.

Por otra parte, bajo el desarrollo de la Oleo hidráulica Veron en su documento de cálculo de motores para vehículos²⁷, el coeficiente de rozamiento “ μ_e ” de césped sobre goma o caucho es de 0,4. Finalmente, la velocidad del movimiento se establece en relación a las recomendaciones establecidas por las empresas de podadoras que indica que los accidentes ocurren a velocidades de 6 a 8 millas por hora²⁸ lo que equivale a 2.5 metros por segundo. Para finalidad de este trabajo de grado se considera una velocidad más baja, de 0.125 metros por segundo para los cálculos relacionados para el consumo de corriente de los motores, teniendo en cuenta que a mayor velocidad mayor será el consumo.

Los motores por utilizar dependen del sistema de tracción seleccionado que para la implementación de este trabajo se selecciona la tracción diferencial para un robot

²⁷ Oleohidraulica VEREON- Aplicación para motores hidráulicos. [Consultado: 27 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: http://www.verion.com.ar/images/productos/tablas-de-conversion-y-formulas/aplicaciones_para_motores_hidraulicos.pdf

²⁸ k state research and extension. Seguridad al cortar y podar el césped [Consultado: 27 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: http://nasdonline.org/static_content/documents/1935/d001880-s.pdf

con cuatro ruedas dado que brinda mayor estabilidad en el desplazamiento y mejor control de giro, por lo cual que se pueden utilizar dos o cuatro motores.

Calculando la potencia máxima de consumo de los motores se obtiene el siguiente valor mostrado en la ecuación 8:

$$Potencia\ maxima = 0,4 \times 9.81 \times 10 \times 0.125 = 4.9\ W \quad (8)$$

Para los motores se requiere de 4.9 W para dependiendo el número de motores a utilizar esta potencia se divide (véase ecuación 9).

$$Potencia\ para\ 4\ motores = \frac{4.9}{4} = 1.225\ W \quad (9)$$

Para calcular el par motor o torque se tiene que tener en cuenta la velocidad que se estima que el robot deba tener. En este caso se estima una velocidad de 0.125 m/s y el radio de las ruedas dando como la ecuación 10, 11.

$$Torque = \frac{potencia\ por\ motor}{Velocidad/radio} \quad (10)$$

$$Torque\ 4\ motores = \frac{1.225}{0.125/0.06} = 0.588\ N/m \quad (11)$$

El valor de 0.588 N/m se utiliza para la obtención de los motores los cuales son indispensables para el movimiento del robot con solo 4 motores.

7.1.3 Selección de motores. Se determina motores paso a paso por su opción de medir con precisión el ángulo de giro con relación al número de bobinas que posee cada uno. En el cuadro 2 se muestran diferentes opciones de motores para utilizar y se presentan algunas de las posibilidades que brinda el mercado.

CUADRO 2 Posibles motores a utilizar para la tracción del sistema.

Nema 23	Estos motores paso a paso son ideales para proyectos. son utilizados en máquinas como CNC (control neumático computarizado) y routers. Este es un motor paso a paso Nema 23 bipolar con ángulo de paso de 1.8° (200 pasos / revolución). Cada fase toma 2.8A, lo que permite un par de retención de 1.26Nm (178.5 oz.in).
POLOLU-1200	Este motor Paso a paso tamaño NEMA 17 cuenta con un sistema híbrido de conexión tal que puede ser usado como motor unipolar o bipolar con un rango de paso de $1,8^{\circ}$ (200pasos/revolución). Cada fase consume 1.2 A a 4V manteniendo un torque de 3.2Kg-cm (44oz-in).
57BYG250C	Motor paso a paso bipolar de 1.8Nm de torque, soporta un voltaje máximo de 24V, y consume una corriente nominal de 3A.
57STH56	Motor paso a paso bifásico con un torque de 1.2Nm, lo cual le provee de una buena fuerza para aplicaciones que le exijan una buena cantidad de potencia. Gracias a las características de torque que presenta y por información del fabricante este motor puede llegar a manejar un nivel de corriente de 2.5A

Tabla 2 Tabla comparativa de los motores

motor	par motor	voltaje de trabajo	corriente de trabajo	giro	peso
	(N/m)	(V) voltios	(A)amperios	grados (°)	Kg
Nema 23	1.26	2.5	2.8	1.8	0.7
POLOLU-1200	0.32	4	1.2	1.8	0.35
57BYG250C	1.79	12-24	3	1.8	1.2
57STH56	1.2	12-24	2.5	1.8	0.7

Fuente: Autor.

En la tabla 2 se ve el comparativo de los posibles motores a utilizar Se seleccionó el motor 57STH56 (mostrado en la figura 15) debido a que el torque estimado con una carga de 10 Kilogramos es favorable según los cálculos obtenidos. De igual manera este motor opera con un voltaje de 12 a 24 voltios, rango que se ajusta al de baterías de fácil adquisición. En el anexo A se presenta la simulación de este motor que permite estimar la corriente de este sin carga.

Figura 15 Motores 57STH56



Fuente: Autor.

7.1.4 Selección de motor de giro de la cuchilla. Las cuchillas de las podadoras convencionales manejan velocidades entre 3000 y 4000 RPM, por lo cual se buscan motores de corriente continua en este rango de velocidad. La tabla 3 resume algunas alternativas.

Tabla 3 Resumen de alternativas para motor DC para la cuchilla

motor	RPM	voltaje	corriente	torque
		V (voltios)	A (amperios)	N/m
SPOMH NK4170	3000-3700	12	0,5	1
SLT47701	3100-3900	12	0,22	0,95
TRS-775	3000-3500	12	4,3	0,86
GM25-370CA	3000	12	0,09	0,125

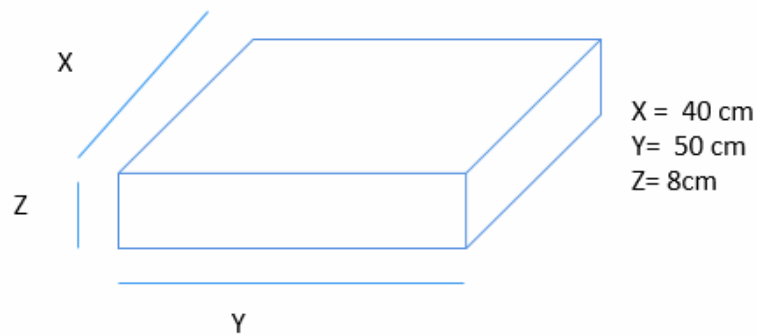
Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta la tabla 3 se selecciona el motor SLT47701 dado que presenta las condiciones óptimas para el giro de la cuchilla, presentando alto velocidad y alto torque.

7.1.5 Estructura mecánica. La estructura se basa en podadoras convencionales y en la altura requerida para el corte del césped. La cuchilla para una podadora de eje vertical esta entre los 30cm a 40 cm de largo por lo que el ancho de este debe ser 40 cm o superior. La regulación de corte indica que el corte del césped no puede sobrepasar por ningún motivo los 8 cm de altura del césped por lo que se utiliza esta altura como referencia para el diseño. Por lo tanto, la base para el prototipo consta con las siguientes dimensiones mostradas en la figura 16.

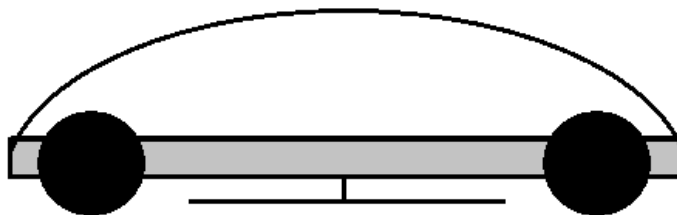
Se utiliza un margen adicional para el acoplamiento de motores para que no se vean afectados por la cuchilla. En las figuras 16 ,17,18 y 19 se muestran los parámetros generales de diseño y construcción de la estructura del robot, teniendo en cuenta parámetros de podadoras comerciales lo cual se utilizó de guía para la creación del prototipo. También se muestran las dimensiones a utilizar en cuanto a la altura y dimensiones generales esperadas.

Figura 16 Imagen de estructura básica para el prototipo



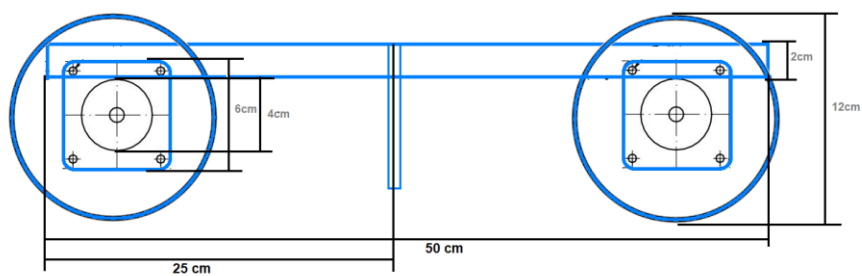
Fuente: Autor.

Figura 17 Imagen del desarrollo esperado de la podadora



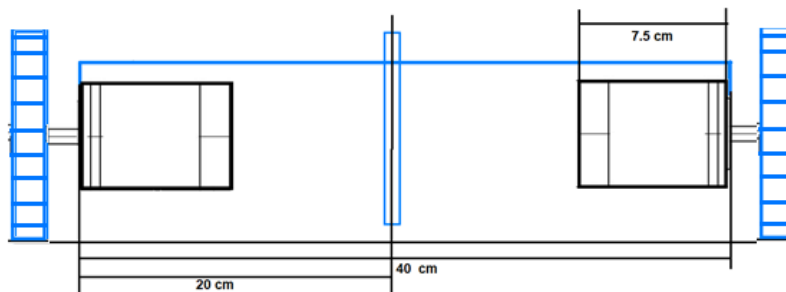
Fuente: Autor.

Figura 18 Vista lateral del diseño de la podadora



Fuente: Autor.

Figura 19 Vista frontal del diseño de la podadora



Fuente: Autor.

Se utilizan láminas de aluminio en forma de L con un ancho de 2cm para realizar un marco de 40 cm x 50 cm, en la cual se ajustan los motores que tiene un tamaño de 6 cm de alto por 6 cm de ancho y 7,5 cm de largo, los cuales presentan una protuberancia en forma circular de un diámetro de 4 centímetros que no permite el acoplamiento de los motores correctamente por lo que se ajustan sobre este límite a la lámina de aluminio.

La base sobre la que reposan los componentes es de plástico hueco con el interior acanalado, lo cual brinda una buena durabilidad y resistencia. Adicionalmente, para adaptar las ruedas se utilizan acoples directos al eje del motor. El motor de la cuchilla se une a un eje con la punta roscada para atornillar una cuchilla de tres aspas que funcionan generando una succión ascendente lo que permite levantar el césped y sea más fácil realizar el corte.

7.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

7.2.1 Sistema de control

7.2.1.1 Sistema de navegación – Odometría.

El sistema de navegación a utilizar se determina por cuestiones de terreno y facilidad del desarrollo. Los parámetros para seleccionar el sistema se basan en el terreno y la precisión que se desea obtener. Dado que se utiliza un método de trayectorias establecidas con anterioridad, se requiere una buena precisión por lo que el sistema de GPS no es una buena opción dado que puede presentar errores hasta de 5 metros lo cual no es una opción favorable para tener una buena precisión en la ejecución de las trayectorias.

También se tiene que tener en cuenta el enfoque del trabajo de grado que es para zonas amplias y se tienen que desplazar de un lugar a otro por lo que la opción de triangulación con estaciones base como puntos de referencia es un requerimiento de cargar más elementos que se pueden ver afectados por las condiciones de entorno como lo es la luz. Por otra parte, si se utilizan infrarrojos o el uso de radiofrecuencia de bandas libres pueden generar inconvenientes en el momento de ejecutar la trayectoria.

Teniendo en cuenta estos parámetros, se opta por la odometría, ya que no depende de elementos externos y no se ve afectado por factores ambientales como el clima dado que es un sistema que estima la posición a partir del giro de las ruedas y utiliza un sensor que no se ve del todo afectado por parámetros ambientales como lo es el magnetómetro, porque solo utiliza el norte como punto de referencia. Utilizando la odometría como sistema de navegación es necesario considerar un robot de tracción diferencial dado que se requiere validar los giros efectuados por cada una de las ruedas.

Cabe aclarar que, para la estimación del giro de los motores, no se requiere de “Encoders” puesto que se optó por motores paso a paso que permiten controlar de forma precisa los ángulos de giro. En el anexo B, se presentan simulaciones del sistema de navegación mediante odometría en la que se presentan los comportamientos generales según su configuración.

7.2.1.2 Magnetómetro. El magnetómetro es un dispositivo que puede medir los campos magnéticos circundantes los cuales dan valores cuantificables de los campos para poder medir su dirección y fuerza; en el cuadro 3 podemos ver algunas de las opciones que nos ofrece el mercado y que presentan una fácil adquisición.

CUADRO 3 Alternativas magnetómetros

MPU6050	Contiene un giroscopio de tres ejes con el que podemos medir velocidad angular y un acelerómetro también de 3 ejes con el que medimos los componentes X, Y y Z de la aceleración, el acelerómetro trabaja sobre el principio piezoeléctrico, posee además de un sensor de temperatura.
QMC5883L	Es un módulo de chip múltiple de montaje en superficie diseñado para la detección magnética de campo bajo con una interfaz digital para aplicaciones como el compás de bajo costo y la magnetometría.
HMC5883L	Es un magnetómetro de 3 ejes digital con interfaz I ² C. También se conoce como brújula digital diseñado para medir campos magnéticos débiles). El rango de escala completa es de +/- 8 gauss y la resolución del sensor es de hasta 5 mili-gauss.

Estos dispositivos utilizan el protocolo de comunicación I²C el cual consiste en la transmisión de datos por un solo cable que se nombra como SDA envía y recibe información y el puerto SCL que se utiliza para recibir un pulso de reloj, el cual determinara el paso de la información.

Se opta por el magnetómetro HMC5883L dado que este está diseñado para medir campos magnéticos débiles y nos brinda la opción de encontrar la posición magnética del norte en campos abiertos.

7.2.1.3 Dispositivo de control digital. La selección de hardware para el procesamiento debe tener la capacidad de realizar procedimientos complejos y bastantes pesados por lo que se debe tener un nivel de procesamiento mayor a 1GHz y una memoria RAM de 1 GB como mínimo para realizar los procesos de manera rápida y eficaz.

En el mercado se encuentran distintos dispositivos embebidos que sirven como unidad de control para el robot con facilidades de programación. En el cuadro 4 se presentan algunas opciones.

CUADRO 4 Alternativas de unidades de control

Arduino	El Arduino es una plataforma de código abierto que consta de un hardware y un software programable flexibles y fáciles de usar es utilizado por todo tipo de personas para el desarrollo de diversos proyectos dado que tiene una amplia cantidad de sensores que miden el entorno.
ODROID-XU4	El ODROID-XU4 es sistema embebido que maneja Ubuntu 16.04 y Android 4.4 KitKat, 5.0 Lollipop y 7.1 Nougat.lo que permite el manejo a grandes velocidades de transferencia y de comunicación para la creación de diversos programas.
Raspberry pi 3	Es un sistema embebido diseñado para el aprendizaje de informática en el reino unido está basado en el lenguaje de programación Linux el cual permite ejecutar tareas programables con un bajo consumo de energía.

La tabla 4 resume las características del sistema de control a utilizar mostrando las condiciones cualitativas del sistema requerido teniendo en cuenta los parámetros de procesamiento y la adquisición de este.

Tabla 4 Selección de sistema embebido

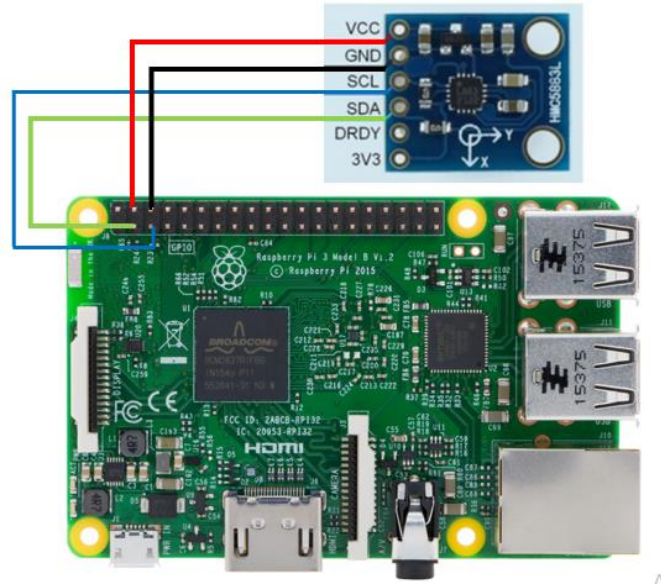
opción más favorable	
opción aceptable	
opción menos favorable	

Paramentos de selección	Arduino	Odroid XU4	Raspberry pi 3
Costo (COP)	\$ 80.000	\$ 205.000	\$ 175.000
Memoria (KB)	32	2000	1000
Procesamiento (Hz)	16MHz	2GHz	1.2GHz
voltaje de entrada (V)	7 a 12	5	5
pinos entradas y salida de datos	20	30	40
asequibilidad			

Fuente: Autor.

A partir del resumen de la tabla 4, se opta por la tarjeta Raspberry pi 3 pi dado que ha sido uno de los pilares en sistemas embebidos y presenta un mejor soporte. Dado que fue creada como un miniordenador, tiene un manejo de procesamiento mayor para futuros aportes sobre este mismo sistema o sobre mejoras que se puedan tener. Además, su gran ventaja es que posee módulos de comunicación incorporados como LAN inalámbrica o módulo de comunicación Bluetooth que facilitan la comunicación con el dispositivo. En la figura 20 se muestra la conexión que requiere el magnetómetro con la tarjeta Raspberry pi 3 para el correcto funcionamiento con la conexión de los puertos SDA y SCL.

Figura 20 Conexión de magnetómetro a la tarjeta Raspberry pi 3



Fuente: Autor.

7.2.2 Sistema de potencia

7.2.2.1 Driver para movimiento de motores. Partiendo de la potencia requerida por los motores, calculada previamente, se estima la corriente que deben soportar los drivers. Para esto se requiere encontrar la corriente máxima generada (I_n) por los motores que se da al momento del arranque que está estimada en 8 veces la corriente nominal o de trabajo de los motores. Para obtener este dato se requiere el voltaje de la batería a usar que es de 12 V (véase la ecuación 12,13,14).

$$I_n \text{ con batería de } 12 \text{ V} = \frac{P_{max}}{V_{bateria}} = \frac{4.9}{12} = 0.408A \quad (12)$$

$$I_{max} = 8 \times I_n = 3.2A \quad (13)$$

$$I_{max} = 8 \times I_n = 1.63A \quad (14)$$

En el cuadro 5 se muestran las diferentes alternativas para el controlador de cada motor. Teniendo como parámetro de referencia el torque y la corriente máxima que requiere el sistema.

CUADRO 5 Alternativas de drivers para los motores

Módulo L298N	<p>Este módulo cuenta con un circuito puente H y un regulador de voltaje que da la posibilidad de manipular dos motores DC para que giren en ambos sentidos dependiendo de la configuración que tenga en sus entradas. En este caso se utilizará para inducir las diferentes bobinas que tiene el motor paso a paso.</p> <p>Este módulo soporta un máximo de 4 amperios de corriente directa y 45 voltios de entrada.</p>
Módulo 2ph64011a	<p>Este módulo cuenta con el circuito ULN2003APG que consta de 7 diodos que permite realizar la configuración solo con 4 de sus entradas conectar el motor paso a paso. Este módulo trae 4 diodos indicadores para de notar los pasos del motor. Soporta una gran cantidad de voltaje hasta 50 Voltios.</p>
Módulo TB6600	<p>El TB6600 es controlador de potencia confiable y versátil, para motores bipolares y unipolares, cuenta con protección contra cortocircuitos y un opto acoplador de alta velocidad para garantizar la seguridad del dispositivo de control sin perder velocidad en la señal. Permite la configuración de diferentes ángulos de pasos, y la corriente de cada fase del motor por medio de los interruptores DIP. El controlador soporta una corriente pico máxima de 4A.</p>

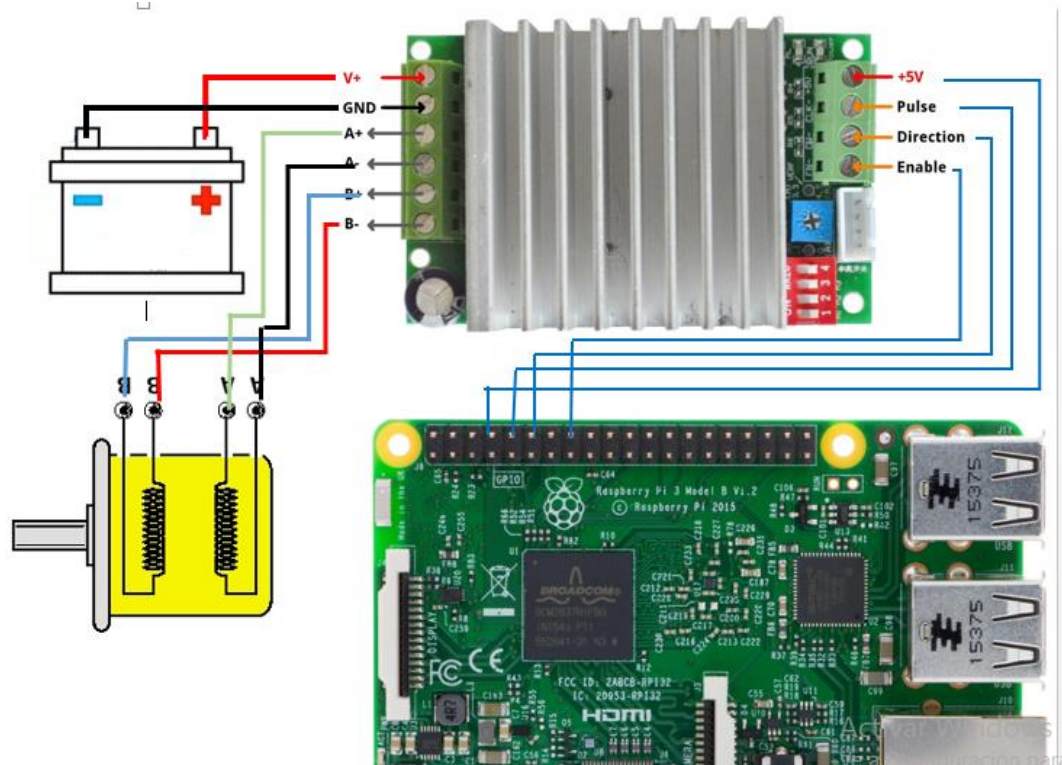
Tabla 5 Selección de módulos de potencia para control de motores

modulo	Corriente	voltaje
	amperios (A)	voltios (V)
2ph64011a	2	50
TB6600	4.5	50
L298N	2	50

Fuente: Autor.

La tabla 5 resume los módulos de potencia que se pueden encontrar en el mercado y las respectivas características para su elección. Según los cálculos realizados se opta por el módulo TB6600. La figura 21 muestra las conexiones necesarias para el módulo de potencia con la tarjeta Raspberry pi 3 y los motores y la alimentación de estos.

Figura 21 Conexión de módulo de potencia de los motores

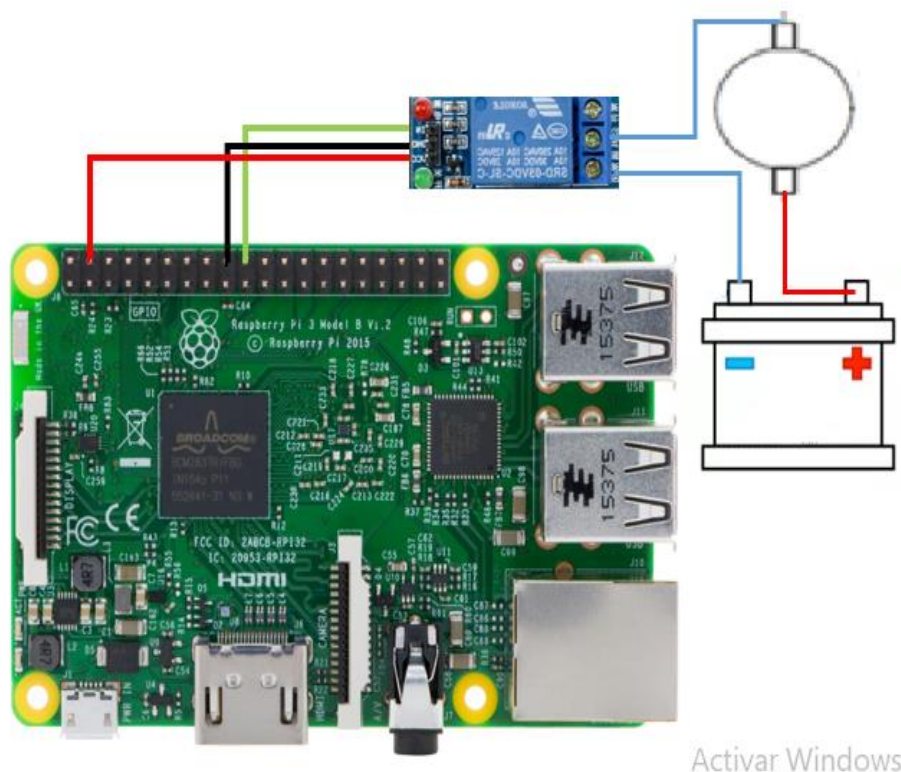


Fuente: Autor.

7.2.3.3 Driver para el motor de cuchilla

La cuchilla debe presentar la totalidad de la velocidad posible por el motor por lo que se opta por una conexión directa. Por medio de un relevo se efectúa el accionamiento del motor con un simple pulso desde la unidad de control. El relevo que se utiliza debe poder soportar 12 Voltios y 3 Amperios. El relevo utilizado soporta hasta 30 voltios en corriente continua y 10 amperios por lo que es óptimo y sobrepasa las características requeridas. Se opta por este modelo más robusto por el constante encendido y apagado que puede generar daños en el dispositivo. La figura 22 muestra las respectivas conexiones a utilizar.

Figura 22 Conexión de motor por medio de relé



Fuente: Autor.

7.2.3.4 Selección de baterías

B. Batería para Raspberry pi 3. Se utiliza una batería externa para carga de celulares dada que es económica y permite facilitar el manejo de la tarjeta Raspberry pi 3. Es óptima, dado que proporciona el voltaje y la corriente necesaria para la alimentación de esta, lo cual precisa una duración extensa del funcionamiento de la Raspberry pi 3 durante aproximadamente 6 horas, dado que la batería tiene capacidad de 2.2 Ah y entrega hasta 1 A. La tarjeta Raspberry pi 3 en máximo rendimiento consume 350 mA que serían 1.8 W (véase la ecuación 15,16).

$$I_{\text{raspberri}} = 350\text{mA} \quad (15)$$

$$\frac{2200 \text{ mAh}}{350\text{mA}} = 6.28 \text{ h} \quad (16)$$

C. Batería de alimentación de motores. Comercialmente se encuentran baterías más comúnmente de 12 voltios y 6 voltios. Según las características más comunes de los motores se proceden a utilizar una batería de 12 voltios.

Para su selección, se estimó la capacidad de la batería a partir de la autonomía requerida. Estimando un tiempo mínimo de operación continua de 1.5h, se busca en el mercado diferentes tipos de baterías y las de posible adquisición son las mostradas en la tabla 6.

Tabla 6 Tabla selección de batería

baterías	voltaje(V)	potencia (W)	Capacidad (Ah)	peso (Kg)
npw36-12	12	36	7	2,2
6N6-3B-1	6	3.6	6	1,5

Fuente: Autor.

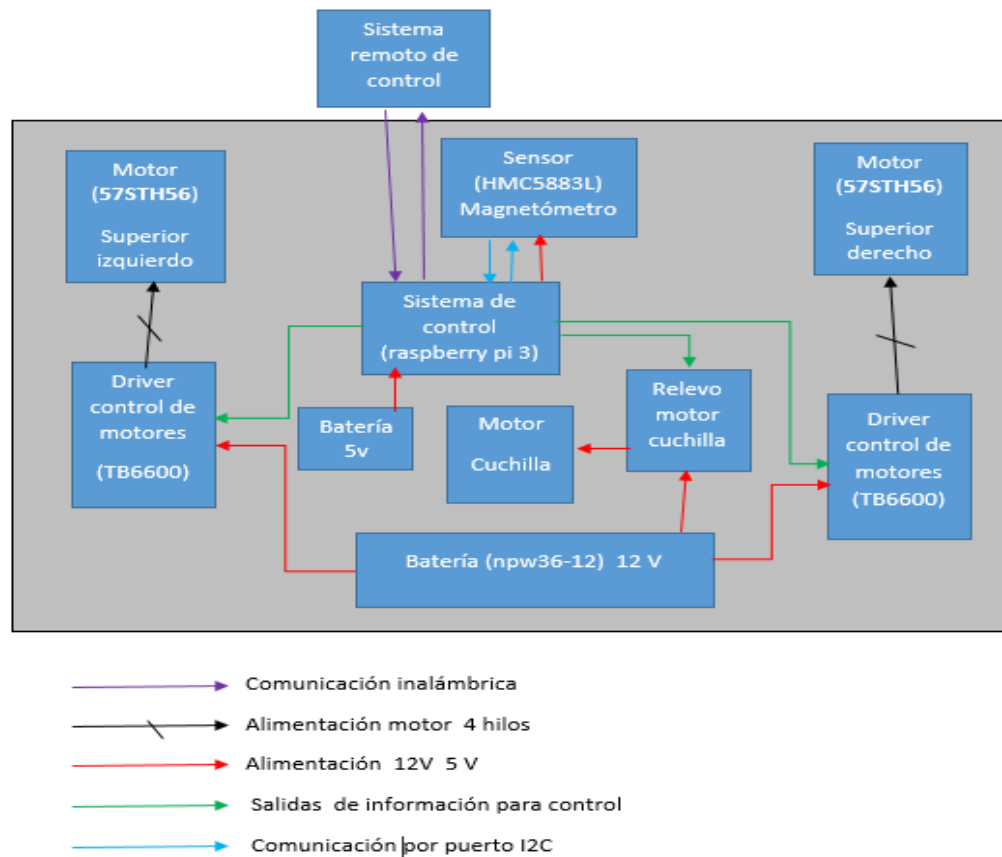
Teniendo en cuenta los datos relacionados en la tabla 6 se identifica el tiempo que durará la batería que se seleccione (véase ecuación 17,18).

$$I_{\text{motores}} = 2.5 \text{ A} \quad (17)$$

$$\frac{7\text{Ah}}{2.5\text{A}} = 2.8 \text{ h} \quad (18)$$

En la figura 23 se muestra un diagrama de bloques con los diferentes módulos seleccionados que hacen parte del diseño electrónico. Este se puede dividir en sistema de control y sistema de potencia.

Figura 23 Diagrama de bloques general del dispositivo.

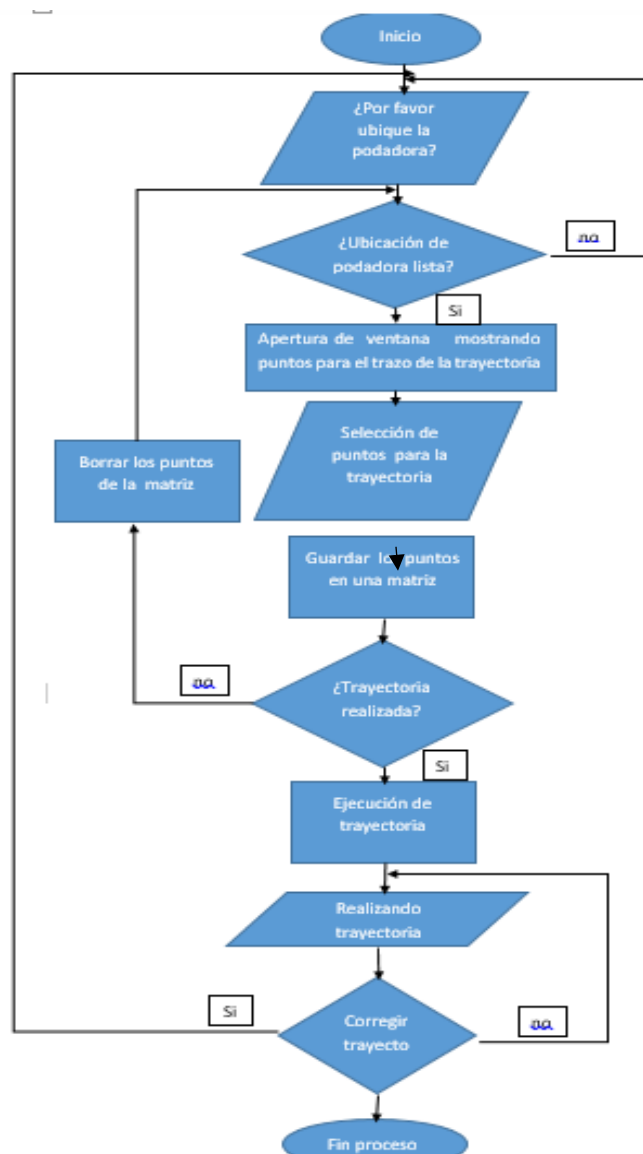


Fuente: Autor.

7.2.4 Diseño software

El software va ligado a la facilidad del operador para manipular la podadora por lo que se realiza un diagrama general visto en la figura 24 del procedimiento a realizar para establecer cualquier trayectoria marcando sobre el plano cartesiano ubicando como posición inicial cualquiera de los puntos.

Figura 24 Diagrama de flujo del proceso general



Fuente: Autor.

Para el seguimiento de trayectorias se requiere de un controlador de ángulo. Para ello, una alternativa sencilla es el controlador on/off.

Adicionalmente, se aumenta la eficacia de la trayectoria dado que se miden con el mismo sensor un magnetómetro el cual va a guardar un dato inicial y con respecto a este se valida el ángulo a girar y se realiza el giro correspondiente. Dado que los motores que se tienen son paso a paso también se maneja un control de giro preciso según la ventana que estos posean, en este caso de 1.8° o 7.2° dependiendo de su configuración.

A partir de los pasos realizados por el motor, se puede determinar la distancia recorrida y también el ángulo de giro teniendo en cuenta las dimensiones de la rueda y el paso de los motores.

Para calcular el movimiento en línea recta se toma el valor del paso por el perímetro de la rueda (véase ecuación 19,20,21).

$$Distancia(w) = 2\pi r \quad (19)$$

$$2\pi r = 360^\circ \quad (20)$$

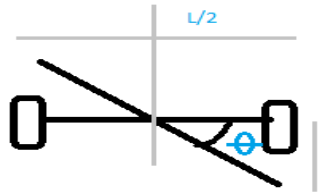
$$pasos = \frac{360^\circ}{7.2^\circ} = 50pasos \quad (21)$$

Eso quiere decir que cada 50 pasos se moverá el dispositivo la distancia total del perímetro de las ruedas.

Para los cálculos de un giro hay que tener en cuenta la distancia que hay entre las dos ruedas frontales y a partir del punto medio se determina el número de pasos

para un giro. La figura 25 muestra los parámetros que se requieren para calcular el ángulo de giro requerido donde “L” es la distancia que se mide de un extremo de la rueda a la otra, “ θ ” el ángulo de giro requerido y “l” la distancia que recorre la rueda para llegar al ángulo correspondiente dando como resultado “ α ” que es el ángulo de giro total de las ruedas siendo “r” el radio de la rueda utilizada.

Figura 25 Esquema para giro tracción diferencial



Fuente: Autor.

$$l = \alpha \times r \quad (22)$$

$$l = \frac{\theta L}{2} \quad (23)$$

$$\alpha = \frac{\theta L}{2r} \quad (24)$$

Con las anteriores ecuaciones (22,23 y 24) se determina el ángulo a girar. Teniendo en cuenta los pasos del motor se determina qué cantidad de pasos se necesitan para el ángulo requerido dividiendo α en 7.2° obteniendo el número de pasos necesarios para realizar el giro.

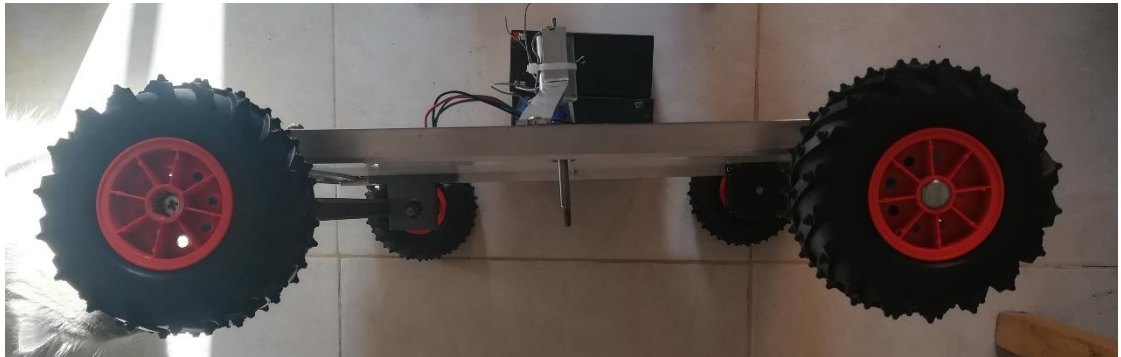
La corrección de la trayectoria se ve reflejada por un punto de referencia que se toma como el norte y el ángulo inicial con respecto al norte que se encuentre el prototipo. Dado que es el único punto de referencia que no cambia en cualquier tipo de entorno, si existe algún cambio en el ángulo en el que se deba mover el dispositivo, este inmediatamente se corregirá y seguirá avanzando en línea recta.

8. IMPLEMENTACION

8.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MECANISMO

8.1.1 MONTAJE DE LA ESTRUCTURA. Para la estructura se utiliza un marco de aluminio en el que se ajustan los motores con remaches agregando una lámina adicional en la parte inferior para dar rigidez y evitar que las ruedas tengan inclinaciones. Las figuras 26 y 27 muestran los vista frontal y lateral del robot y se observa cómo se ajusta cada uno de los motores al marco metálico.

Figura 26 Vista lateral de la podadora montaje realizado



Fuente: Autor.

El motor se ajusta por medio de dos láminas de aluminio situadas a los costados laterales de la podadora lo cual le da rigidez y evita que este se mueva. Se realiza acople del motor a un eje central con la punta roscada para adicionar la cuchilla deseada. El eje tiene un largo de 8cm, lo cual da una ventana de acople y permite que la cuchilla de corte quede a una altura de 3 cm, siendo esta la altura requerida y estipulada por la ley de corte de Bogotá.

Figura 27 Vista frontal de la podadora montaje realizado



Fuente: Autor.

Las figuras 28, 29 y 30 muestran el resultado final del desarrollo de la podadora en la cual se utiliza una base hecha en plástico hueco resistente y se realiza un cubrimiento con acrílico para evitar daños en los dispositivos electrónicos a causa de factores externos

Figura 28 Vista lateral de la podadora terminada



Fuente: Autor.

Figura 29 Vista frontal de la podadora terminada



Fuente: Autor.

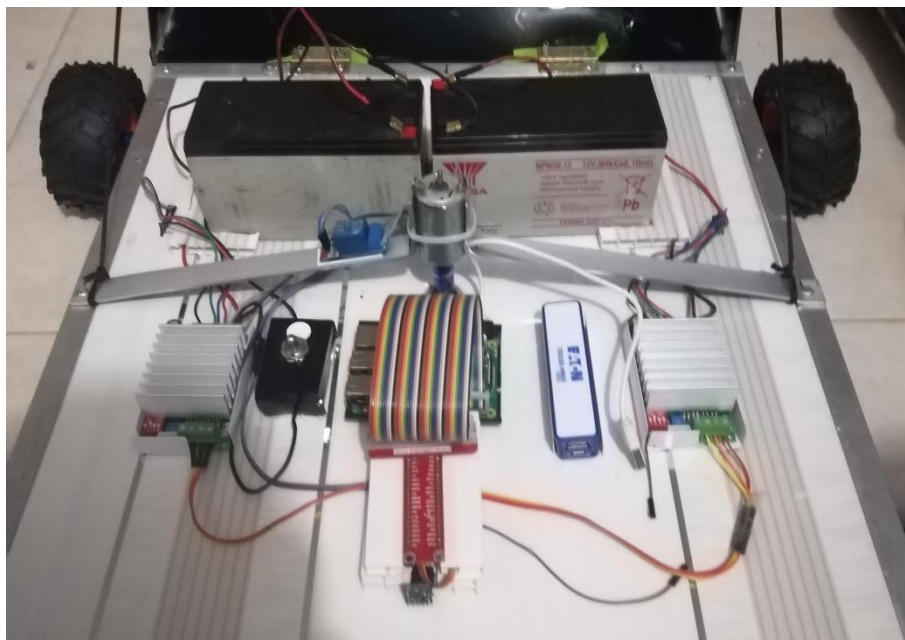
Figura 30 Vista general de la podadora terminada



Fuente: Autor.

8.2 IMPLEMENTACION ELECTRONICA

Figura 31 montaje final de la podadora



Fuente: Autor.

La figura 31 muestra la terminación del montaje final de la podadora de césped con la totalidad de conexiones, las fuentes independientes de baterías para los motores y para la tarjeta Raspberry pi 3.

8.2.1 COMUNICACIÓN CON DISPOSITIVO DE CONTROL. La comunicación se establece utilizando algunas de las ventajas que presenta la tarjeta Raspberry pi 3 con su módulo integrado de WI-FI, con el cual se configura para conectarse a una red y por medio de otro dispositivo conectado a esta red entrar a la configuración de esta por consola o por medio visual, dado que es necesario utilizar una herramienta que permita ver la trayectoria trazada utilizando el modo grafico para poder programar y ejecutar el programa.

El dispositivo permite instalar software que haga la integración de Python con el escritorio remoto que utiliza Windows por lo que es una muy buena herramienta para el control de este dispositivo y adicionalmente configurar la estación remota con una aplicación de celular. Esto constituye una forma rápida de acceso al control y la programación del sistema embebido que es el cerebro de operaciones con el que se puede entrar a programar todos los requerimientos para el robot. La figura 32 muestra el dispositivo de control tarjeta Raspberry pi 3.

Figura 32 sistema de control -Raspberry pi 3



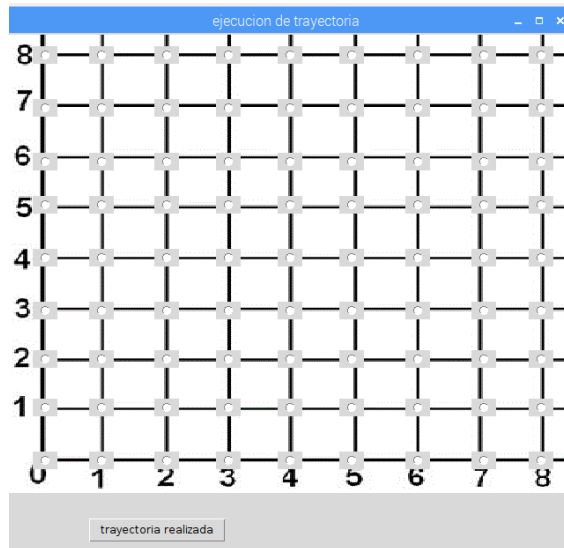
Fuente: Autor.

8.2.2 DEFINICION DE TRAYECTORIA. Para la definición de trayectorias se realiza un programa en Python el cual se basa el sistema de control para el desarrollo de programación; en este el operador colocara la trayectoria que desea para su ejecución.

La trayectoria se establece a través de un plano cartesiano. A cada punto se le asigna un valor dependiendo el orden seleccionado se determina en el paso a seguir y el movimiento seleccionado teniendo en cuenta que el primer punto seleccionado será la posición inicial de la podadora ubicándola en paralelo al eje “y” la parte delantera enfocada en el mismo sentido a donde los números aumentan. El manual detallado se encuentra en el anexo E.

Se crea una aplicación que muestra un plano cartesiano como se muestra en la figura 33 en el cual se coloca por medio de botones las direcciones en las que se va a desplazar el robot.

Figura 33 Esquema para definir las trayectorias



Fuente: Autor.

8.2.3 EJECUCIÓN DE LA TRAYECTORIA. Teniendo en cuenta estos puntos se determinó la distancia D a recorrer, utilizando el teorema de Pitágoras según los datos tomados en el eje “X” y “Y”. Al momento de establecer la trayectoria se determina la longitud considerando este teorema para cualquier tipo de diagonal que se genere. En este punto se considera la distancia que recorre la rueda con un giro contando el número de pasos que ejecuta para realizar un solo giro teniendo en cuenta que se tiene motores de resolución de giro de 1.8° (g) de giro por cada paso y cuatro bobinas la totalidad de pasos necesarios, serian 50 para un giro completo (véase la ecuación 25).

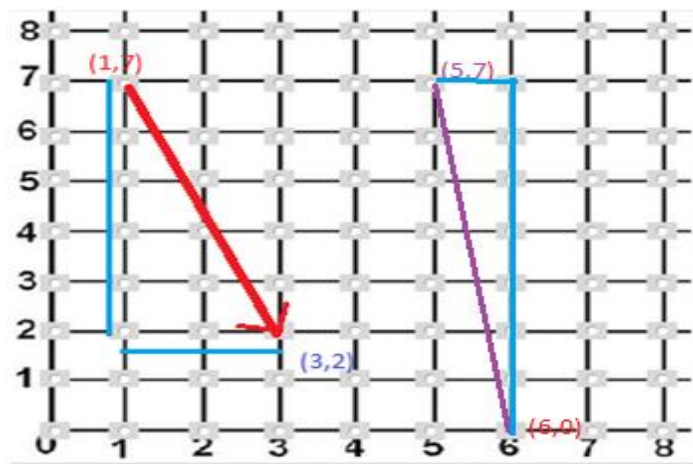
$$1.8^\circ \times 4 \times 50 = 360^\circ \quad (25)$$

Teniendo en cuenta todos los posibles movimientos, se pone a consideración los giros posibles y la determinación de cada ángulo que se puede tomar dependiendo de la pendiente y la variación que se tiene en el eje “Y”.

En la figura 34 se ve un ejemplo de un posible cambio de dirección en trayectoria y como es resuelta para la ejecución precisa del movimiento del robot. Cambia la posición desde el punto (1,7) al punto (3,2) analizando esta trayectoria y se nota que se tiene una pendiente negativa y la variación en “Y” es de manera descendente. $m = \frac{j-y}{i-x}$ Teniendo en cuenta esta ecuación para determinar la pendiente “m” y los valores de las Coordenadas donde la posición (x, y) es la posición inicial y la posición (i, j) es la final. Si está pendiente es negativa, se va a sumar grados a un punto de referencia y si la pendiente es positiva, se le resta a este valor de referencia, que es tomado a partir de la posición inicial de la podadora por un magnetómetro que brinda un ángulo con respecto al norte.

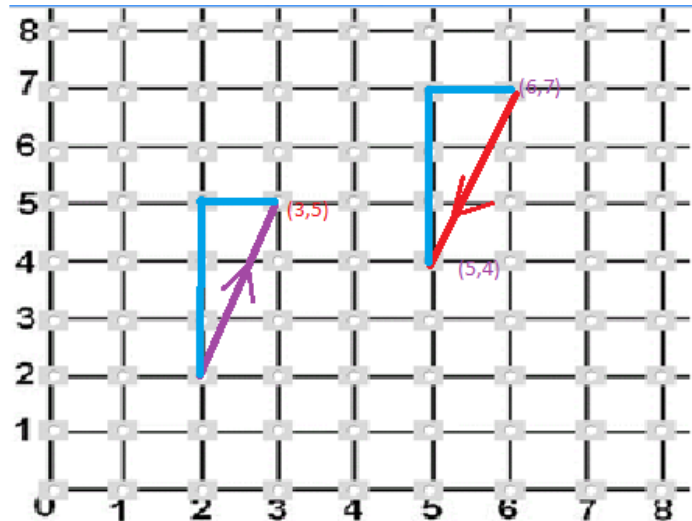
Se realiza el análisis de todas las trayectorias posibles y del esquema de triángulos que se pueden ejecutar, definiéndolas todas como triángulos rectángulos por lo que se puede establecer ciertos parámetros de medición para los ángulos a ejecutar.

Figura 34 Ejemplo trayectoria con pendiente negativa



Fuente: Autor.

Figura 35 Ejemplos de trayectorias con pendiente positiva



Fuente: Autor.

Con el análisis correspondiente para todas las variaciones, se decide tomar siempre las componentes de tal manera que pueda tener el eje “Y” como referencia de medición del ángulo en la que este sea el cateto opuesto.

Como se ve en las Figura 34 y 35 se ve el cambio de la pendiente respecto al movimiento deseado y el cambio en “Y” es descendente. Al punto de referencia se le suma 180° para determinar el ángulo correctamente. Si el cambio en la posición de “Y” fuera positivo no es necesario la suma de los 180° el ángulo a desplazarse sería $\phi = \text{sen}^{-1} \frac{(j-y)}{\text{Distancia}}$ que con trigonometría básica se logra determinar el ángulo que se tiene que adoptar para continuar con la trayectoria.

Tabla 7 Tabla cambio de ángulo

cambio de ángulo		pendiente	
		positivo	negativo
cambio en "Y"	positivo	referencia - $(90^\circ - \theta)$	referencia + $(90^\circ - \theta)$
	negativo	referencia + $(90^\circ + \theta)$	referencia - $(90^\circ + \theta)$

Fuente: Autor.

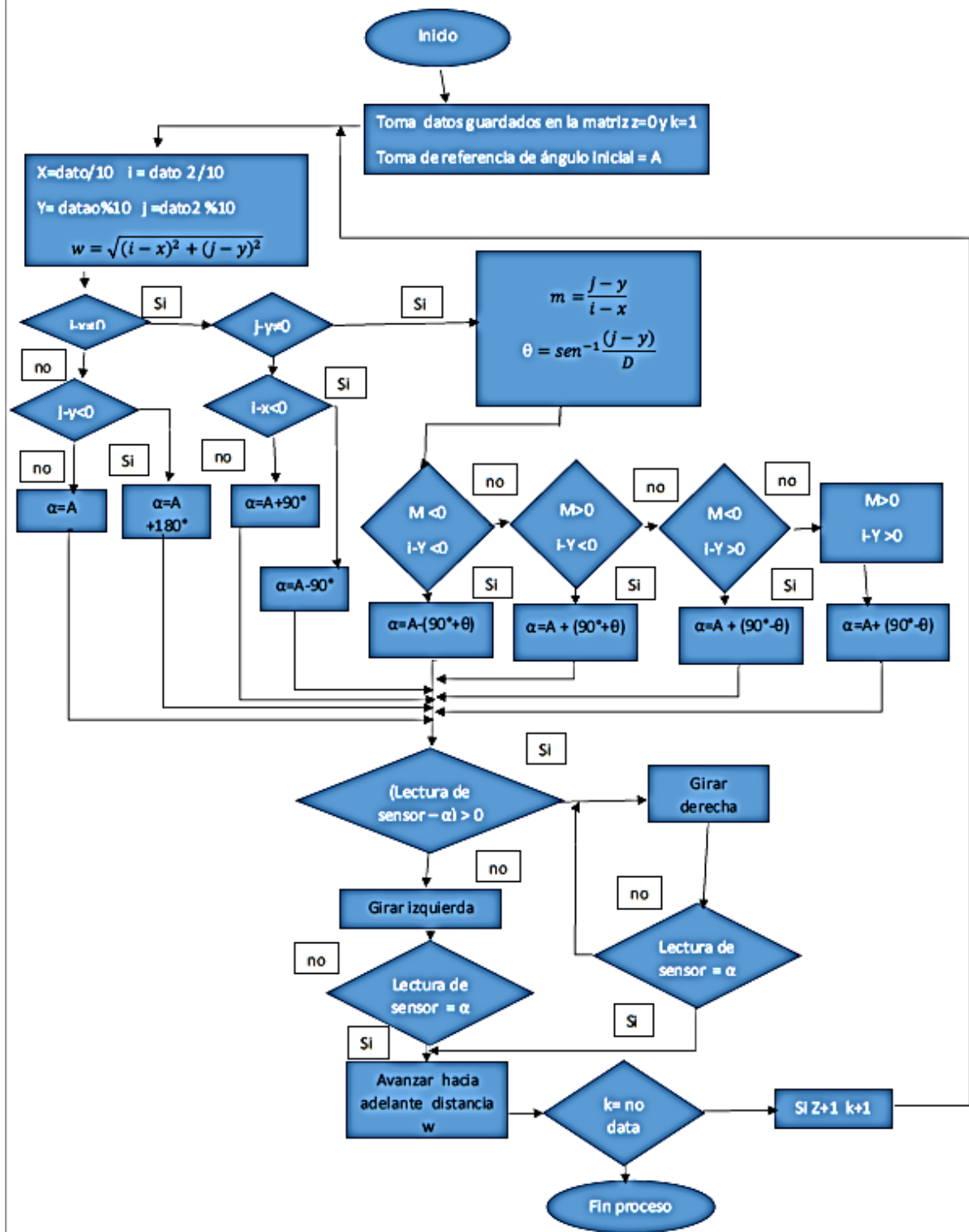
Teniendo en cuenta la tabla 7 se determina el ángulo correspondiente a tomar por el robot según el punto de referencia que tenga el magnetómetro.

El robot girará hasta encontrar el ángulo correspondiente. El sentido en el que gire será determinado según el ángulo que este midiendo el magnetómetro menos el ángulo al posicionarse. Si esta resta es negativa girará a la izquierda y si es positiva girará a la derecha.

También se nota que no son los únicos movimientos posibles. Se nota que las trayectorias pueden mantenerse sobre el eje "y" o sobre el eje "x" por lo que es necesario validar los cambios si son positivos o negativos; si no hay cambios sobre el eje "x" significa que el desplazamiento se realizara sobre el eje "y" por lo que es necesario hacer la resta de la posición inicial con la posición final. Si esta resta es positiva, el movimiento será en la misma dirección que nuestra referencia tomada por que el desplazamiento sería hasta que la referencia tomada sea igual a la referencia que se esté midiendo en el momento.

La figura 36 muestra el diagrama de flujo de la lógica del programa en la que se presenta el análisis de los parámetros que se establecen en el plano cartesiano al momento de establecer la trayectoria y cómo el punto de referencia tomado de la brújula se retroalimenta con la posición actual que muestra.

Figura 36 Diagrama de flujo de la ejecución de trayectorias



Fuente: Autor.

Como resultado se obtuvo que se puede ejecutar cualquier tipo de movimiento si es definido en pequeñas rectas para así construir una curva; para que estas curvas se puedan ver de mejor manera es necesario aumentar la resolución de los puntos a tratar por el dispositivo, como se muestra en el ejemplo de la figura 37.

Figura 37 Simulación de curvatura a partir de rectas



Fuente: Autor.

Realizando pruebas se nota que la precisión es muy buena en terrenos planos, no se presentan desviaciones considerables al momento de ejecutar la trayectoria, aunque el magnetómetro se ve afectado por distintos campos magnéticos por lo que fue necesario aislar muy bien los motores y ubicar el magnetómetro a una distancia considerable para no tener interferencias.

En las mediciones tomadas al momento de generar las trayectorias en terrenos irregulares se ve que hay pérdidas en las distancias recorridas dado que no se tuvo en cuenta como una medida prioritaria el cambio en la altura.

8.2.4 CONFIGURACION DEL MAGNETÓMETRO. Son esenciales las conexiones respectivas de la tarjeta Raspberry pi 3 al magnetómetro para la recepción de datos, dado que dicha tarjeta cuenta con dos únicos pines que funcionan para este tipo de comunicación. En las configuraciones del sistema embebido es de vital importancia activar la recepción de datos I²C dado que por defecto esto se encuentra deshabilitado.

Para configurar el magnetómetro y con la opción de I²C activa que es un bus de dos cables que permite la comunicación bastante rápida de modo bidireccional, lo que brinda al instante datos de entrada del sensor. Por lo general esta función esta deshabilitada por lo que es necesaria la activación entrando a la configuración de la tarjeta Raspberry pi 3. A continuación se muestran las respectivas conexiones que se deben realizar.

Figura 38 Configuración de magnetómetro con puerto I²C de la tarjeta Raspberry pi 3

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo i2cdetect -y 1
    0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
10:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
20:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
30:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
40:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
50:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
60:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
70:  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --  --
```

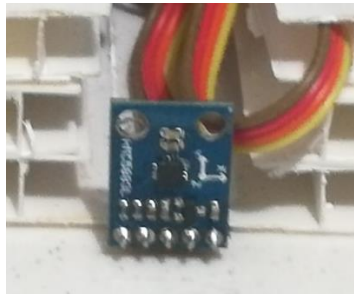
Fuente: Autor.

En la figura 38 se ve como la tarjeta Raspberry pi 3 reconoce el magnetómetro por lo cual se puede empezar a utilizar dentro del código y utilizarla como la referencia para poder medir los ángulos de giro.

Se toma lectura de los datos que brinda el magnetómetro en sus ejes X, Y y Z marcando los valores máximos y mínimos que el sensor proporciona, se realiza

validación del cambio y tomando como referencia una brújula normal la cual da el enfoque principal asociando los grados de diferencia de la brújula mecánica con respecto a la digital que se utiliza pasando estos datos digitales a grados para una mejor manipulación de estos. La conexión del dispositivo y su ubicación determinan los ejes a utilizar de la brújula como se observa en la figura 39. La configuración de esta se muestra los ejes X y Z como ejes principales dado que el eje Y varia en cuestión de la altura que se encuentra el dispositivo.

Figura 39 Conexión del magnetómetro en el prototipo



Fuente: Autor.

8.2.5 CONTROL DE MOTORES. En primera instancia se realiza la configuración de los motores paso a paso determinando el orden de los pasos para tener mayor torque o mayor velocidad. En la figura 40 se presentan las conexiones respectivas requeridas de los módulos a los motores.

Figura 40 Conexión de módulo TB6600 a los motores



Fuente: Autor.

Se realizan distintas pruebas con las distintas configuraciones de secuencias de los pasos para verificar la velocidad y la fuerza; para la ejecución de estas trayectorias se prefieren movimientos lentos y precisos ya que si la velocidad es alta podría desestabilizar la podadora y la trayectoria podría cambiarse. Es preferible que tenga mayor fuerza dado que el terreno en el que se desplaza es grama y no siempre es plano.

En el anexo C se muestran las configuraciones realizadas para cada prueba variando la secuencia de los pasos de uno de los motores paso a paso, analizando la mejor opción para el desarrollo de este trabajo de grado .

Se tienen tres configuraciones: paso sencillo, en que la que el eje se mueve al medio de un de par de las bobinas internas del motor dependiendo el orden de la inducción de estas bobinas se realiza el giro; paso completo, en el que se utiliza una sola bobina inducida por lo que el eje interno se ubica mirando directamente hacia una de las bobinas; medio paso, que se utiliza para aumentar la fuerza de giro, utilizando una mezcla de las dos secuencias anteriores, primero ve fijamente a una bobina y en el siguiente paso se encuentra en medio de la primera bobina inducida y la próxima.

Para determinar la distancia y el movimiento del prototipo, teniendo en cuenta la secuencia de pasos a utilizar, se realizan pruebas en conjunto a los motores y con el módulo TB6600 que brinda una mejor disipación de calor y permite un mayor paso de corriente sin verse afectado.

Se realiza la conexión del módulo TB6600 en sus cuatro pines de control y sus 4 salidas al motor. De igual manera se conecta la batería al módulo para la entrega de potencia total.

Conectando los pines de salida de la tarjeta Raspberry pi 3 a los módulos y las salidas de un módulo TB660. Para este diseño es necesario el uso de dos módulos, uno para cada motor; se realizan distintas secuencias de prueba para los movimientos del motor.

Los motores tienen que configurarse para determinar el movimiento del robot según como sea deseado, adelante, atrás, izquierda o derecha según sea el caso que requiera el sistema (ver configuración de pasos para desplazamiento de los motores en Anexo D).

8.2.6 CONTROL CUCHILLA. Se realiza la asignación de un puerto GPIO de la tarjeta Raspberry pi 3 para encender la cuchilla. Al momento de iniciar la trayectoria el puerto GPIO 10 (número 18) se activa y la cuchilla empieza a girar gracias al accionamiento de un relé, el cual se apaga al momento de terminar la trayectoria.

Figura 41 Conexión de relé a motor de cuchilla



Fuente: Autor.

En la figura 41 se ve la conexión del relé al motor de la cuchilla donde la alimentación del relé proviene directamente de la tarjeta Raspberry pi 3 como su pin de control para activar y desactivar el mismo y su conexión directa al motor.

8.3 PRUEBAS REALIZADAS

Relacionando el perímetro de las ruedas que es de 0.38 m, se determina la distancia a recorrer y el número de pasos necesarios para recorrer esa distancia. Teniendo en cuenta en el plano cartesiano la distancia entre los puntos del eje “X” y “Y”, se determina la distancia promedio por el tamaño de la cuchilla de 40 cm por lo que el recorrido generar entre los puntos es de 40 cm. Teniendo esto en cuenta se genera la tabla 8 que relaciona la distancia a recorrer y el número de pasos requeridos.

Tabla 8 Relación de pasos con la distancia recorrida

numero de pasos	distancia recorrida (m)	# de giros totales
500	0,38	1
658	0,5	1,3
1316	1	2,6
1974	1,5	3,9
2632	2	5,3
3289	2,5	6,6
3947	3	7,9

Fuente: Autor.

En el programa se opta por modificar la distancia requerida entre puntos de 0,4 al valor deseado por el operador dividido por 0.38, que es el perímetro de las ruedas, por el número de pasos por vuelta se obtiene la distancia a recorrer en su equivalente en pasos.

Para realizar los giros se realiza el análisis de pasos realizados con las ecuaciones 22,23 y 24 con el fin de determinar la distancia que tienen que recorrer las ruedas.

Tabla 9 Relación de pasos con la distancia recorrida y el ángulo de giro esperado

ángulo (°)	ángulo (decimal)	distancia recorrida (l) metros	número de pasos vuelta
10	0,174533333	0,043633333	57
45	0,7854	0,19635	258
90	1,5708	0,3927	517
180	3,1416	0,7854	1033
360	6,2832	1,5708	2067

Fuente: Autor.

Teniendo la relación de giro de distancia que se recorre, se estima los pasos obteniendo como resultado los datos que se muestran en la tabla 9 de los motores para girar un ángulo determinado. Dado que cada paso es de 1.8 °, la estimación del giro es bastante aceptable para el desarrollo del trabajo de grado y en las pruebas realizadas se evidencia una buena aceptación de giro.

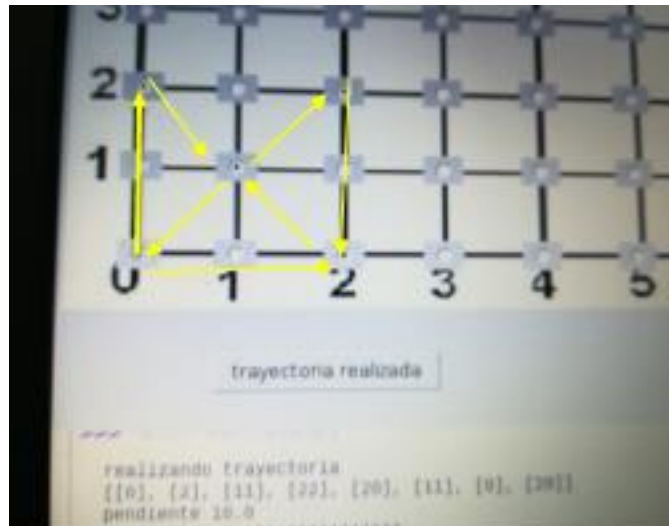
Para la prueba se realiza una ruta que muestre todos los giros posibles para establecer de manera correcta cada uno de los movimientos posibles mostrados en la figura 42.

Figura 42 Simulación de ruta en un espacio controlado



Fuente: Autor.

Figura 43 Imagen de ventana para la programar trayectoria



Fuente: Autor.

Se realiza la selección de puntos los cuales se guardan en una matriz $[[0], [2], [11], [22], [20], [11], [0], [20]]$ como se observa en la parte inferior de la figura 43, que son la representación dentro del código para cada una de las coordenadas. Cada dato se toma y se trata dividiéndolo entre 10 para sacar la posición en "X" y luego se saca el residuo de este para guardarse como la coordenada "Y". Traduciendo estos

datos a coordenadas seria (0,0), (0,2), (1,1), (2,2), (2,0), (1,1), (0,0) y (2,0), aplicando la selección de puntos, primero se toma el primer dato registrado y segundo como datos de referencia para la trayectoria y en el segundo paso se toma como primer dato la coordenada (0,2) y segundo dato la coordenada (1,1) se realizan los mismos procedimientos que son:

Traer el dato de la matriz la coordenada [Z][0] guardada en la matriz y el dato [K][0] tomando las variables “Z” y “K” como elementos que pueden variar para la selección de cada uno de los datos guardados.

Se analiza si hay algún tipo de cambio en “X” o en “Y”, realizando la resta de del segundo valor en cualquier coordenada menos el valor de la primera coordenada (i-x) y (j-y). Si alguno de esto valores es cero significa que en el eje contrario se realizara el movimiento, Luego se verifica que tipo de movimiento es validando la pendiente $m = \frac{j-y}{i-x}$ siendo los datos “x” y “Y” los datos del primer registro y los datos “i” y “j” los datos del segundo registro. A partir de estas consideraciones se ejecutan los cambios de ángulo, teniendo siempre como referencia la toma de un ángulo antes de empezar el movimiento.

En la figura 43 se ve la ruta establecida para las pruebas; se realizan dos tipos de prueba, la primera se efectúa sin el uso del magnetómetro porque se obtienen desfases bastantes altos en el momento de ejecución de la trayectoria. Esto se resume en la tabla 10 mostrando los datos tomados y los errores que presenta la operación del mecanismo con el sensor de retroalimentación.

Tabla 10 Tabla de errores

coordenadas de desplazamiento		distancia	error (cm)	
		(cm)	sin brújula	con brújula
movimiento	(0 a 0) a (0 a 2)	100	0	0
	(0 a 2) a (1 a 1)	70	2	0,5
	(1 a 1) a (2 a 2)	70	2	0,8
	(2 a 2) a (2 a 0)	100	1,5	0,5
	(2 a 0) a (1 a 1)	70	2,5	0,3
	(1 a 1) a (0 a 0)	70	1,5	0,8
	(0 a 0) a (2 a 0)	100	1	0
	total	580	10,5	2,9

Fuente: Autor.

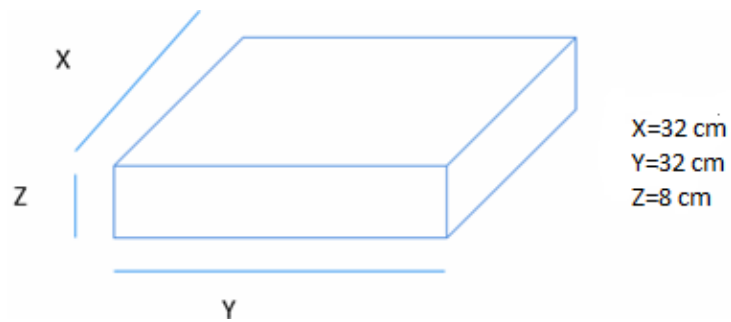
Realizando el análisis correspondiente, se entiende que el apoyo de la brújula mitiga con gran eficacia los errores que presenta el robot al momento de ejecutar la trayectoria dado que se tiene un punto de referencia con el cual el mecanismo se retroalimenta y puede corregir. El error más grande notado se ve evidenciado al momento que el prototipo se desfasa de la trayectoria por algún tipo de desliz dado que el control nota el cambio, pero solo ajusta el ángulo con respecto a la referencia tomada.

8.3.1 Pruebas de velocidad. Los motores paso a paso responden a diferentes velocidades de mejor manera que otra. En cuanto a las pruebas se obtiene una velocidad máxima de aproximadamente 1m/s.

En respuesta de velocidad en 1 metro por segundo, los motores no alcanzan a tomar tracción y el vehículo no avanza: Por otra parte, para una menor velocidad, el dispositivo es demasiado lento. Se toma un valor intermedio de 1 metro en 10 segundos que da buena respuesta en cuanto al corte y el desplazamiento del dispositivo.

8.3.2 Prueba de tracción variando tamaño del prototipo. Las figuras 44,45,46 y 47 muestran el diseño de un prototipo a escala menor en el que se reduce sus dimensiones ajustando a un ancho y largo de 32 centímetros para validación del desarrollo en cuanto a fuerza de los motores para que el giro correspondiente se ejecute sobre la superficie.

Figura 44 Dimensiones de la estructura básica del prototipo



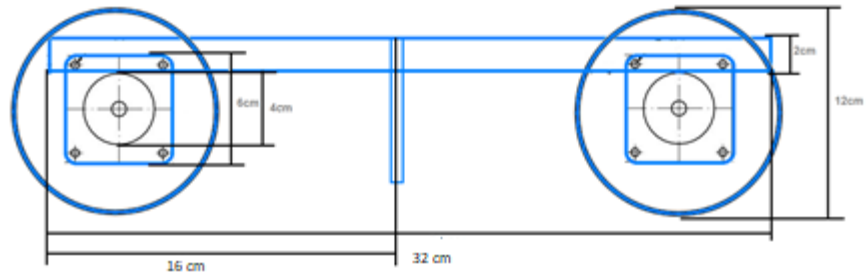
Fuente: Autor.

Figura 45 Imagen del desarrollo esperado de la podadora



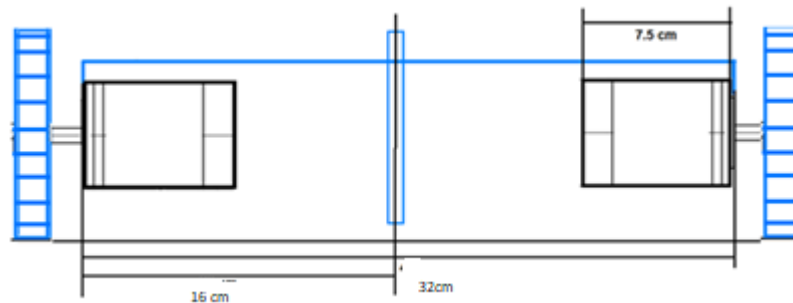
Fuente: Autor.

Figura 46 Vista lateral del diseño de la podadora



Fuente: Autor.

Figura 47 Vista frontal del diseño de la podadora



Fuente: Autor.

Al reducir el tamaño de la podadora se evidencia que, el área de esta no afecta la fuerza de los motores dado que estos presentan fallas no por los cálculos sino en términos de fabricación, es posible que el torque sugerido en los datos de compra no sea el que se dé al momento de utilizarse en campo; Se procede a realizar prueba con motorreductores los cuales poseen una configuración de piñonera para aumentar el torque, se utilizan dos motores con un torque 0.9 Nm que presentan un menor torque al cálculo pero muestran una mayor mejoría al momento de realizar las pruebas en campo se configura por estimación de tiempo para que tenga el mismo comportamiento que los motores paso a paso dado que se requiere establecer la misma precisión.

8.3.3 Pruebas de corte. Se realizan diversas pruebas de corte de césped en las que se nota que el corte se realiza por impacto de las cuchillas. Para esto se requiere una altura de césped adecuada que no supere los 10 centímetros, dado que el dispositivo se frena al momento de pasar sobre el área de corte; cuando el césped no supera los 10 cm de alto, se nota que entre más velocidad tenga el motor de la cuchilla, mejor es el corte del césped. En comparación a los motores de combustión que poseen gran torque y velocidad, los motorreductores requerirían de un juego de engranajes para aumentar la velocidad del giro dado que los motores que presentan gran velocidad no presentan un gran torque por lo que se requiere que la altura de la cuchilla con respecto al campo a podar sea de alrededor de unos 3 a 6 centímetros de alto dado que la densidad del césped afecta la velocidad de giro de la cuchilla.

8.3.4 Pruebas de terreno. Se realiza pruebas del desplazamiento del dispositivo en diferentes terrenos. En principio el diseño se realiza para un terreno semiplano, pero se realizan pruebas en terrenos empinados, lo cual requiere aumentar la fuerza de los motores. Aún con baja velocidad, en un terreno empinado, los motores paso a paso no presentan una buena respuesta y quedan bloqueados.

8.3.5 Prueba de baterías. La batería para la tarjeta Raspberry pi 3 dura un tiempo de 1 hora en uso constante del robot y consume alrededor de 200 mA a 230 mA de corriente dependiendo el uso que se esté presentando; con la batería externa que tiene una duración de 2200 mAh en funcionamiento se obtuvo una duración de una hora y 15 minutos. La batería de cada motor tiene una capacidad de 7Ah y los motores consumen en operación normal 2.5 A, por lo cual se espera una autonomía de 2.5 horas. A esto se tiene que restar el consumo adicional que se pueda tener por sobre esfuerzos del mecanismo. En una prueba de trabajo constante se obtuvo una hora y 40 minutos de trabajo hasta la descarga total.

9. DESCRIPCION ECONOMICA DEL TRABAJO DE GRADO

En la tabla número 11 se evidencian los costos del desarrollo del prototipo sin tener en cuenta la mano de obra, dado que el desarrollo y construcción fue realizado en su totalidad por él autor.

Tabla 11 Costos Finales de la Implementación

Elemento	Valor (COP)	Valor (COP)	Final
Motores paso a paso	\$100.000	\$200.000	
Módulos TB6600	\$38.000	\$76.000	
Magnetómetro HMC5883L	\$15.000	\$15.000	
Batería	\$40.000	\$40.000	
Batería Raspberry pi 3	\$15.000	\$15.000	
Motor para cuchilla	\$40.000	\$40.000	
ruedas	\$7.500	\$30.000	
Raspberry pi 3	\$170.000	\$180.000	
Materiales adicionales		\$50.000	
Valor Total		\$646.000	

Fuente: Autor.

10.CONCLUSIONES

El desarrollo de este tipo de podadora presenta una vista general de otro modo de operar el sistema sin basarnos en el control remoto sino en procesos que se desarrollen sin supervisión constante puesto que es un sistema que solo requiere la intervención inicial de un operador para establecer la ruta lo que da al operador seguridad, dado que este no tiene que estar cerca del dispositivo y al manejar la trayectoria como este desea puede realizar el corte según los parámetros de diseño que se requieran.

El desarrollo de una podadora de césped representa un gran número de inconvenientes mecánicos dado que las vibraciones generadas por las cuchillas aflojan los tornillos que ajustan ciertos componentes del dispositivo como se evidencio en los acoples de las ruedas, los cuales se ajustan a los motores con acoples lo que hace que las ruedas no giren y el motor gire solo generando así inconvenientes en la tracción. En cuanto a la selección de componentes, es requerido el estudio correspondiente de corriente en la parte de potencia, porque en el mercado hay dispositivos que se pueden ajustar a los parámetros, pero se debe tener en cuenta que en el campo esto puede variar debido a sobre esfuerzos en los mecanismos y lo que requiere el dispositivo a nivel general. De igual manera se presenta la misma consideración con respecto al sistema de control puesto que si se requiere mejoras este debe ser capaz de soportarlas sin afectar la integridad de todo el prototipo.

El software requerido para la ejecución de trayectorias se presenta de manera simple con parámetros que se puedan estudiar de manera sencilla, como lo fue la descripción del plano cartesiano y descomponerlo en valores conocidos de tal modo que el usuario pueda manejar sin inconvenientes el dispositivo; lo cual fue uno de los retos del trabajo de grado dado que el lenguaje de programación es un lenguaje

que no es común y se conoció solo hasta el momento de desarrollar este trabajo de grado.

Los motores paso a paso a pesar de dar una buena resolución para el desarrollo de trayectorias y su resolución y control de giro, presentan inconvenientes en cuanto a fuerza para la utilización de este prototipo en terrenos más abruptos, pero la ejecución de giros del robot se puede realizar con un buen margen de aceptación dado que en el césped no se denotan las variaciones con tanta veracidad en cuanto al corte, lo que en parámetros generales da a la odometría y este trabajo de grado buenos resultados.

11.RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los motores paso a paso a pesar de su buena resolución de giro y su control de paso para establecer las distancias recorridas son poco prácticos en cuanto a fuerza y peso, dado que son más pesados que un moto reductor que presenta un juego de engranajes para aumentar el torque de giro, es recomendable utilizar encades que requerirían un mejor manejo en cuanto al diseño mecánico y acople de los dispositivos a las ruedas y las ruedas en sí, dado que esto es fundamental para el correcto desplazamiento del motor: De igual manera se podría realizar la validación del sistema con el sistema arkeman de tracción para controlar los giros del robot en los ángulos respectivos sin tener inconvenientes por bloqueos de las ruedas y de los motores.

El ajuste del prototipo puede aumentarse el control en el eje “Z” para variar la altura del corte ya sea estableciéndola de manera manual o de manera mecánica con el mismo dispositivo de control, dándole así al trabajo de grado mayor campo de acción dado que no en todos los entornos se requieren la misma medida de altura del pasto teniendo como consideración los parámetros de seguridad establecidos.

12. BIBLIOGRAFÍA

A. POZO-RUZ, Maria C. GARCÍA-ALEGRE, Ángela RIBEIRO SANDOVAL, Franciscol. Localización de vehículos: fusión de medidas GPS y odometría. [en línea] consultado [22 de abril 2019] disponible en internet https://www.researchgate.net/profile/Domingo_Guinea/publication/237469731_LOCALIZACION_DE_VEHICULOS_FUSION_DE_MEDIDAS_GPS_Y_ODOMETRIA/inks/004635329b3599f8c5000000/LOCALIZACION-DE-VEHICULOS-FUSION-DE-MEDIDAS-GPS-Y-ODOMETRIA.pdf

AGILE SYSTEMS, INC. automaticlawn mower [en línea]. HUGH A. GRIFFIN. Appl. No.: 717,870. United States Patent. 4,133,404. Jan. 9, 1979. [Consultado: 5 de mayo de 2019]. Disponible en Internet: <https://patents.google.com/patent/US4133404A/en>.

Alvarez Alvarado, Manuel Sebastian. Modelo matemático de un motor de corriente continuo separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura [en línea]. Recibido el 11 de diciembre de 2011; aceptado el 10 de marzo de 2012. [Consultado: 30 de mayo de 2018]. Disponible en Internet: http://www.lajpe.org/mar12/25_LAJPE_611_Manuel_Alvarez_preprint_corr_f.pdf

Anónimo Strategic Assessment of Worldwide Robotic Lawn Mower. Coventry: 07 junio 2016; [Consultado: 27 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: <https://search-proquest-com.ezproxyucdc.ucatolica.edu.co/docview/1794078928?accountid=45660>.

ANONIMO. History of the Lawn Mower [en línea]. <http://www.american-lawns.com>. [Consultado: 16 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: http://www.american-lawns.com/history/history_mower.html

BARRIENTOS SOTELO, Víctor Ricardo. GARCÍA SÁNCHEZ, José Rafael. Dr. SILVA ORTIGOZA, Ramón. Profesor del CIDETEC-IPN. Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte. polibits, 2007, XVII 1, 35. [Consultado: 27 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: https://www.polibits.gelbukh.com/2007_35/Robots%20Moviles_%20Evolucion%20y%20Estado%20del%20Arte.pdf.

COLOMBIA. Alcaldía de Bogotá. Resolución 114 de 2003 (,2003). 2.5 Corte de césped. [En línea]. Resolución 114 de 2003 Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos - U.E.S.P. Bogotá, 2003. [Consultado: 27 de octubre de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=23393>

CORTÁZAR, Francisco, MARTÍNEZ Raquel, FRESNO Víctor. lenguajes de programación y procesadores. Segunda edición. Madrid: centro de estudios ramón areces S.A. 2016.

El, rabbany ahmed introduction to gps: the global positioning system. british library cataloguing in publication data, julio 2002. 28.

GONZÁLEZ JIMÉNEZ, Javier; OLLERO BATURONE, Aníbal. Estimación de la Posición de un Robot Móvil [en línea]. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla. Facultad. 17 febrero 2015. [Consultado: 17 de abril de 2018]. Disponible en Internet: https://www.researchgate.net/profile/Javier_Gonzalez-Jimenez/publication/267222718_Estimacion_de_la_Posicion_de_un_Robot_Movil/links/54ba1f370cf24e50e93dd5de.pdf.

GRISALES RAMÍREZ., Efraín. Control de un robot móvil en entornos domésticos [en línea]. Manizales, Colombia. Universidad nacional de Colombia sede Manizales. Facultad de ingeniería y arquitectura. Departamento de ingeniería

eléctrica, electrónica y computación, 2013. [Consultado: 28 de marzo de 2018]. Disponible en internet: <https://oatd.org/oatd/record?record=oai%5c%3awww.bdigital.unal.edu.co%5c%3a12164>.

KHAMIS RASHWAN, Alaa Mohamed. INTERACCIÓN REMOTA CON ROBOTS MÓVILES BASADA EN INTERNET [en línea]. TESIS DOCTORAL Ingeniero Industrial. Madrid. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2003. [Consultado: 18 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.100.6237&rep=rep1&type=pdf>.

MARISCAL GARCÍA, Efraín. Planeación y seguimiento de trayectorias de robots móviles en una simulación de un ambiente real. [en línea]. En: Ra Ximhai Universidad Autónoma Indígena de México Ra Ximhai, enero-abril, año/Vol.1, Número 1. [Consultado: 18 de abril de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.uaim.edu.mx/webraximhai/12.pdf>.

MASTER'S DEGREE: Industrial Systems Engineering. Controladores industriales de diseño de alto nivel [en línea]. Sistemas Embebidos. INGENIERÍA DE LOS SISTEMAS EMBEBIDOS (HARDWARE -HW) [Consultado: 15 de 05de 2019]. Disponible en Internet: http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE5_3_1.pdf

medline plus. Cortar el pasto puede ser una actividad peligrosa para niños; conoce cómo reducir el riesgo. [en línea], [revisado 13 octubre 2018]. disponible en internet: <https://www.clikisalud.net/cortar-pasto-puede-una-actividad-peligrosa-ninos-conoce-reducir-riesgo/>

MOYA CARRASCO, ángel. Generación de trayectorias en tiempo real a partir de diagramas de voronoi [en línea]. Sevilla. Universidad de Sevilla. Ingeniería de las tecnologías industriales. Departamento de sistemas y automática, 2016. [consultado: 30 de marzo de 2018]. disponible en internet: https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/44404/tfg_angel_moya_carrasco.pdf?sequence=1&isallowed=y

NAVARRO, Danilo., GINES BENET, Gilabert., ríos, Luis Hernando. BUENO L., Maximiliano. Mejoras en la localización odometrica de un robot diferencial mediante la corrección de errores sistemáticos. [En línea] ,29 de marzo del 2018]. disponible en internet: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4035/2291>.

Oleohidraulica VEREON. Aplicación para motores hidráulicos. [Consultado: 27 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: http://www.verion.com.ar/images/productos/tablas-de-conversion-y-formulas/aplicaciones_para_motores_hidraulicos.pdf

OLLERO BATURONE, Aníbal. Robots móviles. En: robótica manipuladores y robots móviles. Primera reimpresión alfaomega Grupo editor, México julio 2008. 28.

PALLAREZ, Mayra. La lista de pastos tolerantes a los diferentes tipos de suelos [en línea]. <http://www.contextoganadero.com>.(16 de mayo de 2016), [Consultado: 11 de febrero de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.contextoganadero.com/reportaje/la-lista-de-pastos-tolerantes-los-diferentes-tipos-de-suelos>

Prevención integral. POSTER: Estudio de los síntomas musculoesquéticos en jardineros. [en línea], [revisado 13 octubre 2018]. Disponible en internet:

<https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2010/poster-estudio-sintomas-musculoesqueticos-en-jardineros>

REDACCIÓN BOGOTÁ. Título: Aumentan quejas por falta de poda de pastos en Bogotá: Crisis es por cambios en contratación. Denuncian problemas de roedores y basuras. Distrito responde. [En línea. Bogotá: El Tiempo, 13 de junio de 2013, 01:05 am. [Consultado: 26 de octubre de 2017]. Disponible en Internet: <http://uao.libguides.com/c.php?g=529806&p=4412778>

RUIZ GAMBOA, Jorge Iván y PAILLACHO CUMBICUS, Christian jose. diseño y construcción de un prototipo de cortadora de césped automática [en línea]. Sangolquí. universidad de las fuerzas armadas - espe. ingeniero en mecatrónica. ingeniería mecatrónica, 2015. [consultado: 1 de abril de 2018]. disponible en internet: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/11526/t-espe-053003.pdf?sequence=1&isallowed=y>

SCAGLIA, Gustavo, QUINTERO MONTOYA, Olga, MUT, Vicente y DI SCIASCIO, Fernando. Seguimiento de trayectoria de robots móviles utilizando método de integración trapezoidal [en línea]. En: AADECA 2006. Congreso Argentino de control automático. Agosto, 2006, [Consultado: 18] de abril de 201]. Disponible en Internet: <http://bit.ly/2PeDnXS>

SEGOVIA DE LOS RIOS, Armando. ZAMORA, Cesar. GARDUÑO, Mayra. Robot Móvil Teleoperado Mejorado para el Transporte de Material Radioactivo [en línea]. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/015/39015133.pdf.

T.A. Laing J. B. O'Sullivan N. Nugent M. O'Shaughnessy S.T. O'Sullivan. Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery. Volumen 64, mayo 2011, **Lesiones pediátricas relacionadas con el cortacésped y manejo de cirugía plástica**

páginas 638-642;(consultado 1 mayo del 2019). [en línea];
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1748681510004754>

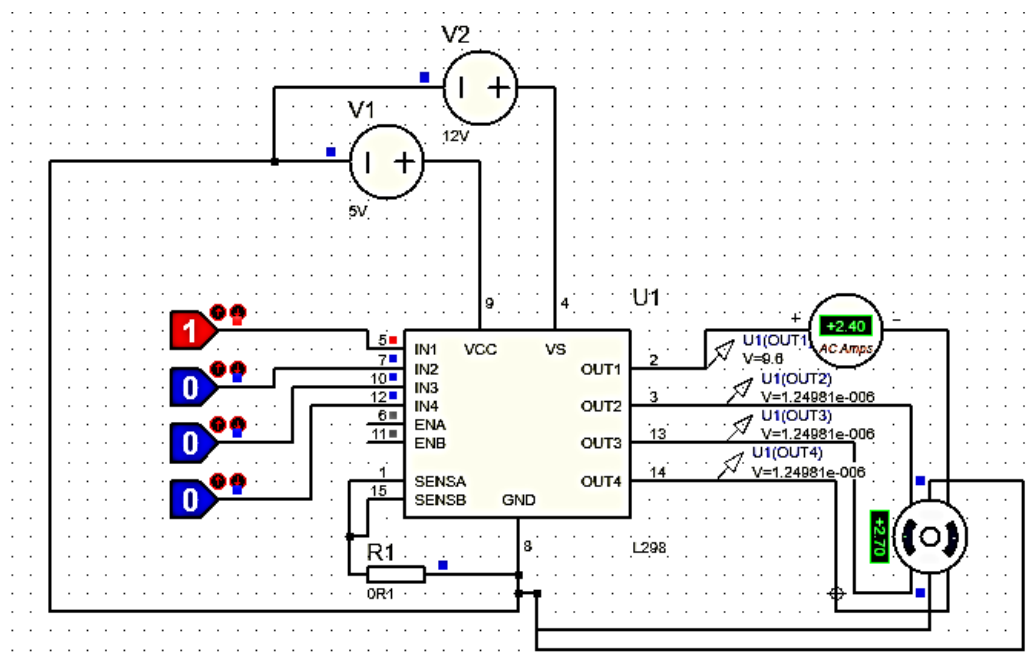
VALENCIA V., Jhonny a.; MONTOYA O., Alejandro; RIOS, Luis Hernando. Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica [en línea]. Universidad Tecnológica de Pereira Pereira, Colombia. [Consultado: 17 de abril de 2018]. Disponible en Internet:
<https://www.redalyc.org/pdf/849/84916680034.pdf>

13.ANEXOS

ANEXO A Simulación de motor

La simulación del controlador con un motor sin carga mostrada en la figura 48 brinda una información general de la corriente que se induce a través del motor 57STH56 el cual presenta una resistencia de 3Ω y 12 mH los cuales son datos que se toman como referencia; la corriente mínima que necesita el motor en este caso es de 2.4 amperios que se estima es el consumo normal sin la carga adicional teniendo en cuenta estos parámetro se tiene una estimación de la corriente que requiere cada bobina y el driver necesario para que opere de manera adecuada el robot (véase figura 48).

Figura 48 Circuito de simulación de motor DC



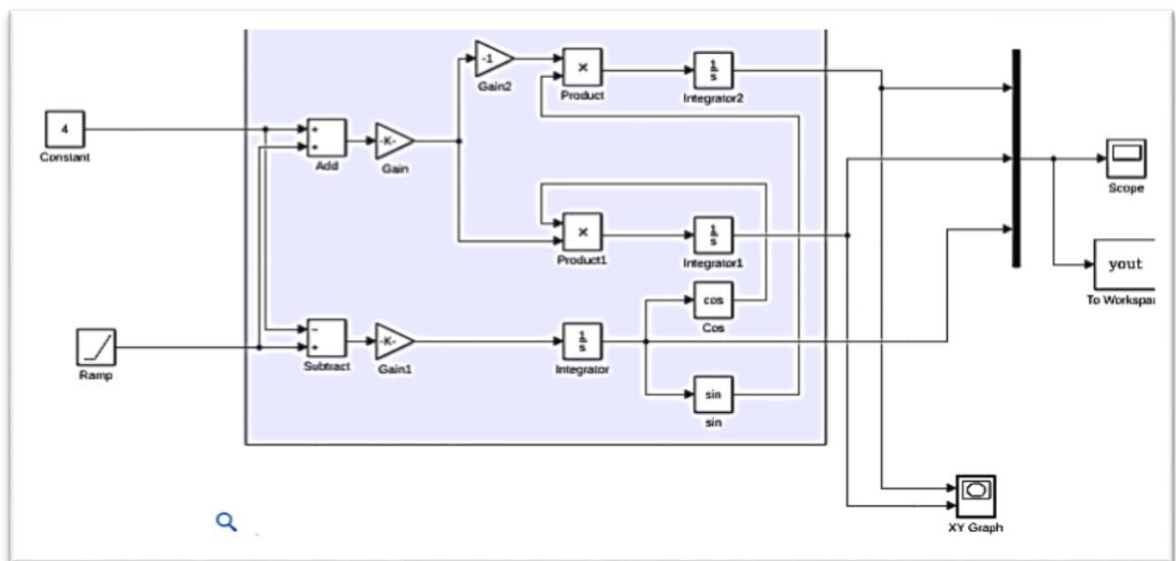
Fuente: Autor.

ANEXO B Simulación del robot diferencial

Para analizar el comportamiento de un robot diferencial se tiene en cuenta las velocidades a las que se mueven cada una de las ruedas en base a esta característica y las ecuaciones encontradas para el análisis vistas en el apartado 5.2.4 de este documento se puede realizar una simulación del comportamiento, para esto se utiliza el software Matlab en el cual se analiza el movimiento con un ángulo inicial de 0° y dos variables de entrada que corresponden a las velocidades de cada una de las ruedas del robot.

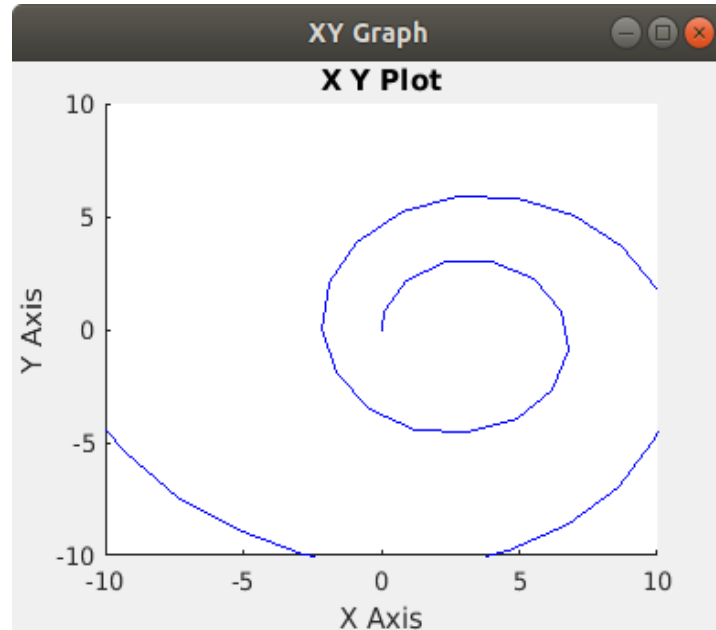
Se realiza un análisis de movimiento del robot en Simulink con dos variables de entrada para las velocidades de cada una de las ruedas en la que se toma un valor constante y la otra es un valor que va en aumento visto en la figura 49 y su respectivo comportamiento se muestra en la figura 50.

Figura 49 simulación con variables de entrada constante y una aumentando



Fuente: Autor.

Figura 50 comportamiento del robot diferencial con una constante de entrada y una que aumenta.

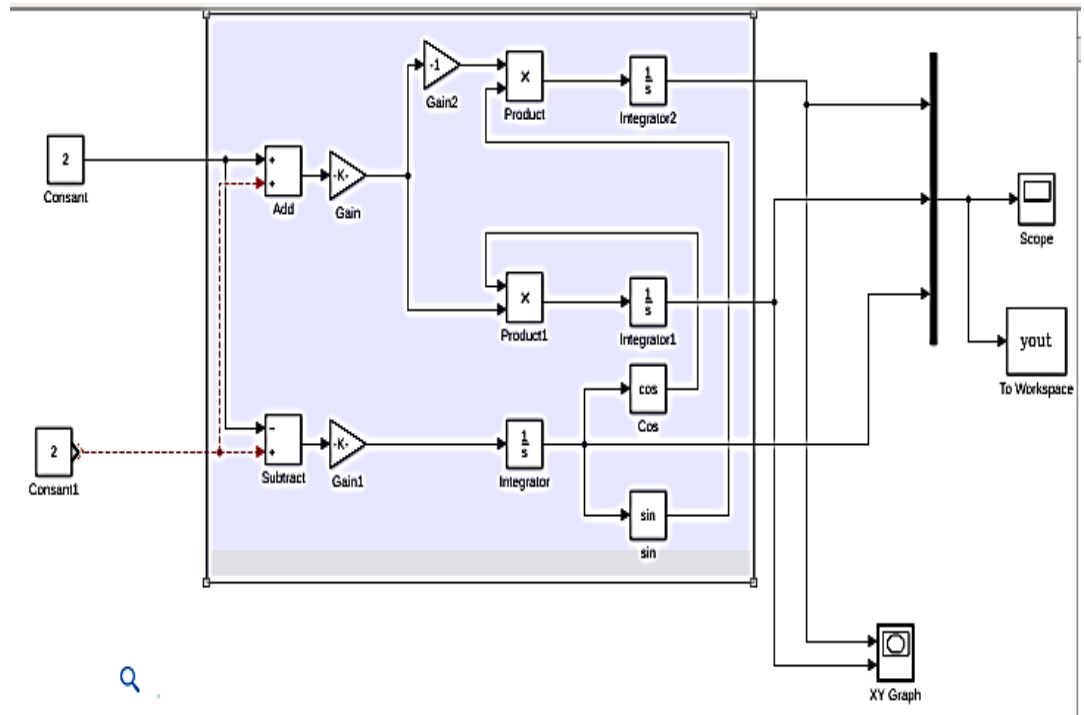


Fuente: Autor.

En las figuras 49 y 50, respectivamente, se muestra un comportamiento en forma de caracol dado que una de las ruedas girara de manera constante mientras que la otra mostrara un incremento en su velocidad.

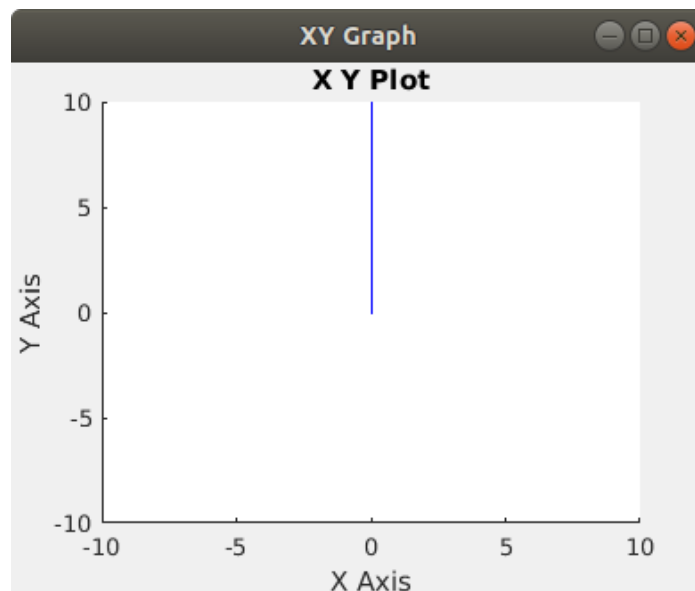
La simulación muestra como el movimiento descrito en el plano cartesiano se muestra con una recta ascendente sin variaciones (figura 51), de igual manera si se tiene las constantes con el mismo valor absoluto, pero de signos contrarios no se describe ningún movimiento sobre los ejes presenta movimiento sobre sí mismo lo cual se puede tomar como un giro sobre el eje si una rueda gira al frente y la otra en dirección opuesta.

Figura 51 Simulación con las dos varietales de entrada constantes



Fuente: Autor.

Figura 52 Comportamiento del robot diferencial con las dos varietales de entrada constantes



Fuente: Autor.

ANEXO C Configuración de pasos de motor

Se muestran las posibles configuraciones de los motores paso a paso en las tablas 12, 13 y 14.

Tabla 12 Configuración paso sencillo

motores		paso doble			
secuencia de pasos	paso 1	1	1	0	0
	paso 2	0	1	1	0
	paso 3	0	0	1	1
	paso 4	1	0	0	1

1	salida en 5V
0	salida en 0V

Fuente: Autor.

Tabla 13 Configuración paso completo

motores		paso completo			
secuencia de pasos	paso 1	1	0	0	0
	paso 2	0	1	0	0
	paso 3	0	0	1	0
	paso 4	0	0	0	1

1	salida en 5V
0	salida en 0V

Fuente: Autor.

Tabla 14 Configuración medio paso

motores		Medio paso			
secuencia de pasos	paso 1	1	0	0	0
	paso 2	1	1	0	0
	paso 3	0	1	0	0
	paso 4	0	1	1	0
	paso 5	0	0	1	0
	paso 6	0	0	1	1
	paso 7	0	0	0	1
	paso 8	1	0	0	1

1	salida en 5V
0	salida en 0V

Fuente: Autor.

ANEXO D Configuración de secuencias para el desplazamiento del robot

A continuación, se muestra el nivel de excitación de los pines y las secuencias para el respectivo movimiento del robot en sus diferentes sentidos adelante tabla 15, atrás tabla 16, derecha tabla 17 e izquierda tabla 18.

Tabla 15 Configuración de pasos de los motores avance hacia adelante

motores		motor derecho				motor izquierdo			
secuencia de pasos	paso 1	1	0	0	0	0	0	0	1
	paso 2	1	1	0	0	0	0	1	1
	paso 3	0	1	0	0	0	0	1	0
	paso 4	0	1	1	0	0	1	1	0
	paso 5	0	0	1	0	0	1	0	0
	paso 6	0	0	1	1	1	1	0	0
	paso 7	0	0	0	1	1	0	0	0
	paso 8	1	0	0	1	1	0	0	1

1	salida en 5V
0	salida en 0V

Fuente: Autor.

Tabla 16 Configuración de pasos de los motores avance hacia atrás

motores		motor derecho				motor izquierdo			
secuencia de pasos	paso 1	0	0	0	1	1	0	0	0
	paso 2	0	0	1	1	1	1	0	0
	paso 3	0	0	1	0	0	1	0	0
	paso 4	0	1	1	0	0	1	1	0
	paso 5	0	1	0	0	0	0	1	0
	paso 6	1	1	0	0	0	0	1	1
	paso 7	1	0	0	0	0	0	0	1
	paso 8	1	0	0	1	1	0	0	1

1	salida en 5V
0	salida en 0V

Fuente: Autor.

Tabla 17 Configuración de pasos de los motores avance hacia la derecha

motores		motor derecho				motor izquierdo			
secuencia de pasos	paso 1	1	0	0	0	1	0	0	0
	paso 2	1	1	0	0	1	1	0	0
	paso 3	0	1	0	0	0	1	0	0
	paso 4	0	1	1	0	0	1	1	0
	paso 5	0	0	1	0	0	0	1	0
	paso 6	0	0	1	1	0	0	1	1
	paso 7	0	0	0	1	0	0	0	1
	paso 8	1	0	0	1	1	0	0	1

1	salida en 5V
0	salida en 0V

Fuente: Autor.

Tabla 18 configuración de pasos de los motores avance hacia la izquierda

motores		motor derecho				motor izquierdo			
secuencia de pasos	paso 1	0	0	0	1	0	0	0	1
	paso 2	0	0	1	1	0	0	1	1
	paso 3	0	0	1	0	0	0	1	0
	paso 4	0	1	1	0	0	1	1	0
	paso 5	0	1	0	0	0	1	0	0
	paso 6	1	1	0	0	1	1	0	0
	paso 7	1	0	0	0	1	0	0	0
	paso 8	1	0	0	1	1	0	0	1

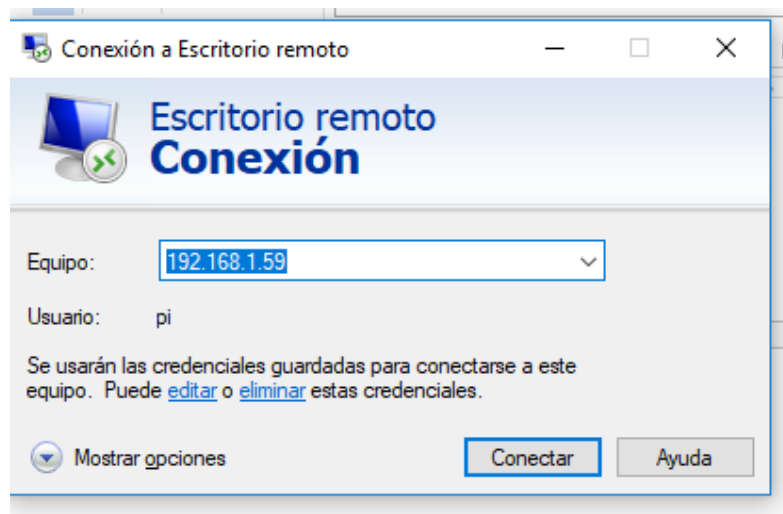
1	salida en 5V
0	salida en 0V

Fuente: Autor.

ANEXO E Manual del usuario

1. Se requiere establecer una conexión WI-FI o con la tarjeta Raspberry pi 3 pi para acceder a esta de manera remota con la dirección IP asignada a esta como se ve en la figura 53 utilizando el protocolo RDP.

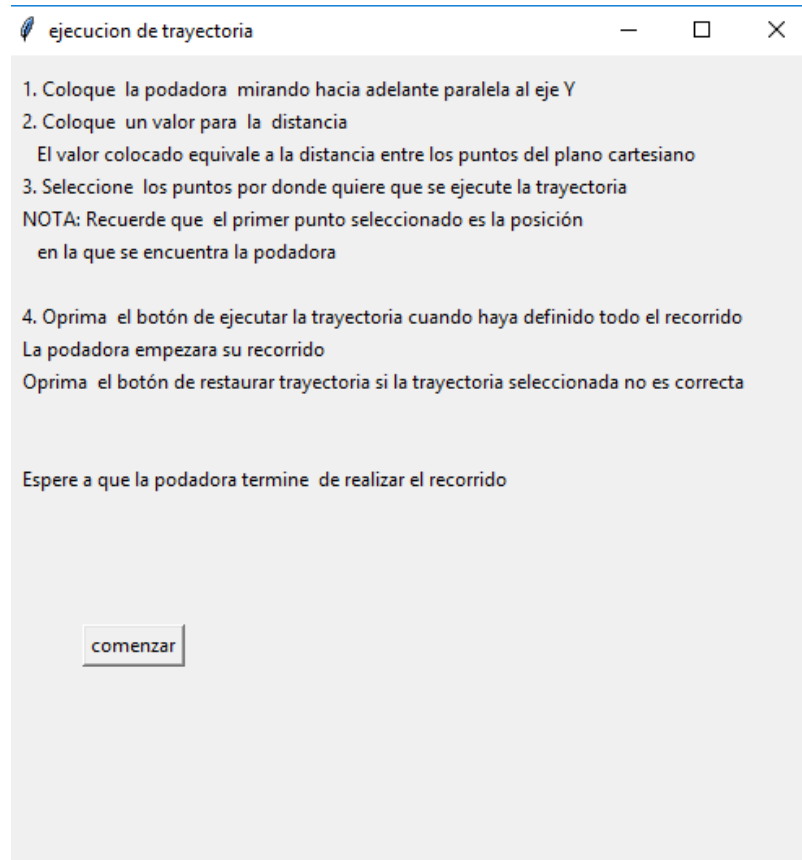
Figura 53 Establecimiento de conexión remota con el dispositivo



Fuente: Autor.

2. Se realiza la ejecución del programa podadora el cual mostrara la siguiente ventana que se ven en la figura 54 la que muestra el procedimiento a seguir después de leer el pequeño instructivo se pulsa el botón comenzar.

Figura 54 Instrucciones para ejecutar la trayectoria



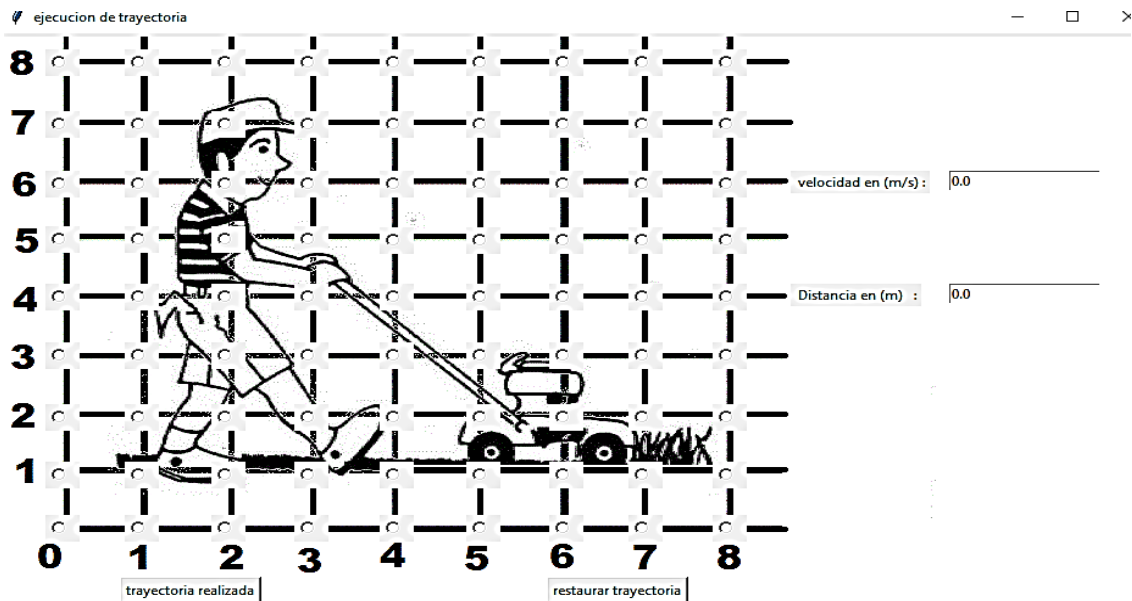
Fuente: Autor.

A continuación, se muestra lo que indica la figura 54.

1. Coloque la podadora mirando hacia adelante paralela al eje Y
2. Coloque un valor para la distancia
El valor colocado equivale a la distancia entre los puntos del plano cartesiano
3. Seleccione los puntos por donde quiere que se ejecute la trayectoria
NOTA: Recuerde que el primer punto seleccionado es la posición en la que se encuentra la podadora
4. Oprima el botón de ejecutar la trayectoria cuando haya definido todo el recorrido
La podadora empezara su recorrido
Oprima el botón de restaurar trayectoria si la trayectoria seleccionada no es correcta
Espere a que la podadora termine de realizar el recorrido

Al oprimir el botón comenzar se mostrará la siguiente ventana vista en la figura 55.

Figura 55 Ventana principal para selección de trayectoria



Fuente: Autor.

Es requerido establecer la velocidad que se quiere para realizar el trayecto se recomienda establecer la velocidad con el valor 1 o menor para el corte correcto del césped y establecer la distancia en 0.4 dado que es el ancho de la cuchilla.

A partir de la matriz de puntos el operador seleccionara el punto inicial que es el lugar donde se encuentra la podadora y desde este se moverá en el orden en el que se pulsan los botones, al terminar la respectiva secuencia o trayectoria requerida el operador pulsa el botón "empezar trayectoria" y el dispositivo se enciende la cuchilla empezara a girar por 5 segundos y luego el dispositivo se moverá según la trayectoria que el operador estableció.